

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie  
Studijní obor: Geografie a kartografie



Hana Klášterková

KLIMATICKÁ CHARAKTERISTIKA HORNÍ HRANICE LESA  
V KARPATECH

CLIMATIC SETTINGS OF CARPATHIANS' TREELINES

*Bakalářská práce*

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Václav Tremel, PhD.

Praha, 2017

## **Zadání bakalářské práce**

**Téma práce:** Klimatická charakteristika horní hranice lesa v Karpatech

### **Cíle práce**

- 1) Zpracování rešerše na téma dynamiky ekotonu horní hranice lesa a faktorů, které ovlivňují jeho formu a polohu
- 2) Vyhledání nejvýše položených horních hranic lesa a určení jejich klimatických charakteristik z blízkých meteorologických stanic a z databáze WorldClim

### **Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje**

*Metody:*

- tvůrčí rešerše na základě aktuální literatury
- vyhledání nejvyšších poloh horní hranice lesa prostřednictvím softwaru Google Earth
- výpočet teplotních charakteristik z dostupných dat meteorologických stanic, datasetu CRU TS 4.00 a databáze WorldClim

*Zájmové území:*

- Karpaty

*Datové zdroje:*

- meteorologická data dostupná ze serveru KNMI
- gridová databáze teplot WorldClim
- gridová databáze průměrných měsíčních teplot CRU TS 4.00

Datum zadání: 01.12. 2016

Jméno studenta: Hana Klášterková

Podpis studenta: .....

Jméno vedoucího práce: Václav Tremel

Podpis vedoucího práce: .....

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze 27.07.2017

Podpis:

**Poděkování:**

Děkuji svému školiči Mgr. Václavu Tremlovi, Ph.D. za podnětné rady, hodnotné připomínky, a především za trpělivost s vedením této práce.

# Klimatická charakteristika horní hranice lesa v Karpatech

## Abstrakt

Horní hranice lesa je zeširoka studovaným fenoménem po celém světě. Její posun do vyšších nadmořských výšek je v posledních letech spojován zejména se změnami klimatu, nicméně mnoho autorů přikládá váhu i měnícímu se využití krajiny člověkem. Cílem práce bylo popsat dynamiku horní hranice lesa a faktory, jež ovlivňují teplotní charakteristiky a tím i limitují postup horní hranice lesa do vyšších poloh. Pro 6 lokalit v Karpatech byly vyhledány nejvýše položené horní hranice lesa a na základě dostupných meteorologických dat byly pro tyto oblasti spočítány některé teplotní charakteristiky. Výsledky vypočtených teplotních charakteristik odhalily, že vyhledané polohy horních hranic lesa ve většině oblastí nedosahují na hranici svého teplotního limitu. Do intervalu minimálních teplot během vegetačního období umožňujících růst stromů (Paulsen a Körner 2004) spadá pouze lokalita Varful Omu ( $T_{\text{ČER-ZÁŘ}} = 7,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). To poukazuje na působení jiných než teplotně limitujících faktorů. Nezanedbatelný vliv na polohu horní hranice lesa má zejména v některých částech Karpat přetrvávající lidská činnost. Poloha horní hranice lesa je způsobem využití krajiny negativně ovlivněna nejvíce v Západních a Východních Karpatech. Výsledky počítaných teplotních charakteristik byly porovnány s některými dalšími evropskými pohořími a v rámci Karpat byly diskutovány možné nepřesnosti a nejistoty ohledně teplotních charakteristik horní hranice lesa.

**Klíčová slova:** horní hranice lesa, Karpaty, vegetace, teplotní charakteristiky, využití krajiny

## **Climatic settings of Carpathians' treelines**

### **Abstract**

Alpine treeline ecotone is phenomenon widely studied around the world. Its shift to greater altitudes is connected mainly with climatic changes recently. However, many authors take into account changes in landuse as well. The aim of this thesis was to depict dynamics of treeline and factors influencing temperature metrics which delimitate advancing of the treeline to higher altitudes. For 6 sites within Carpathians were found the uppermost positions of treeline and several temperature metrics based on available meteorological data were calculated for these locations. Results of calculated thermal metrics revealed that treeline positions in most of the studied areas are situated at altitudes under their climatic limit. Varful Omu with  $T_{\text{JUN-SEP}} = 7,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  was the only one location which meets the stated interval of minimal mean temperatures for growing season (Paulsen & Körner 2004) necessary for tree growth. This fact points out that treelines found within Carpathian Mts. are under pressure of other limiting factors than thermal ones. Persistent anthropogenic activities have a significant influence on treeline positions in some regions of Carpathian Mts. Altitudes of treeline stands are most negatively influenced by human activities in the Western and Eastern Carpathians. Results of calculated thermal metrics were compared with other European mountain ranges and possible inaccuracies and uncertainties regarding thermal metrics of treelines within Carpathians were discussed.

**Key words:** treeline, Carpathians, vegetation, temperature metrics, landuse

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Definice pojmu horní hranice lesa.....</b>	<b>12</b>
<b>3 Limitující mechanismy a formy horní hranice lesa .....</b>	<b>15</b>
3.1 Limitující mechanismy polohy horní hranice lesa .....	15
3.2 Podoby horní hranice lesa.....	16
<b>4 Faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa .....</b>	<b>20</b>
4.1 Přírodní faktory .....	20
4.1.1 Teploty na horní hranici lesa .....	23
4.1.2 Druhá skladba ekotonu horní hranice lesa a její vliv na polohu .....	26
4.1.3 Další přírodní faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa .....	28
4.2 Vliv využití krajiny člověkem .....	31
4.3 Vlivy na průběh horní hranice lesa v Karpatech.....	34
<b>5 Teplotní databáze použitelné pro stanovení teplot na horní hranici lesa .....</b>	<b>37</b>
<b>6 Fyzickogeografická charakteristika Karpat.....</b>	<b>39</b>
6.1 Geologie .....	39
6.2 Reliéf .....	40
6.3 Klima.....	41
6.4 Půdy.....	44
6.5 Vodstvo .....	45
6.6 Vegetace.....	45
<b>7 Metodika .....</b>	<b>49</b>
<b>8 Výsledky .....</b>	<b>52</b>
8.1 Lokality, výšky, formy hranice lesa.....	52
8.2 Teplotní charakteristiky pro lokality .....	56
<b>9 Diskuze .....</b>	<b>60</b>
9.1 Srovnání v rámci Karpat .....	60
9.2 Srovnání s ostatními evropskými pohořími.....	64
9.3 Nejistoty .....	66
<b>10 Závěr .....</b>	<b>68</b>
<b>11 Seznam použité literatury.....</b>	<b>69</b>

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1:</b> schematické znázornění ekotonu horní hranice lesa (Körner a Paulsen 2004). ....	13
<b>Obrázek 2:</b> Příklady forem horní hranice lesa.....	17
<b>Obrázek 3:</b> globální rozložení nadmořských výšek HHL na pevnině a oceánských a šelfových ostrovech v závislosti na zeměpisné šířce (Irl a kol. 2015).....	21
<b>Obrázek 4:</b> snímky z ukrajinských Karpat demonstrující rozdílné formy HHL .....	27
<b>Obrázek 5:</b> poloha horského celku Karpat v rámci Střední Evropy .....	39
<b>Obrázek 6:</b> mapka znázorňující dominující druhy podílející se na utváření HHL ve vybraných částech Karpat (dle Czajka a kol. 2015b).....	47
<b>Obrázek 7:</b> snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Baisoara, výška pohledu cca 3,53 km (Google Earth) .....	53
<b>Obrázek 8:</b> snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Ceahlau Toaca, výška pohledu cca 2,61 km (Google Earth); .....	53
<b>Obrázek 9:</b> snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Paltinis, výška pohledu cca 3,23 km (Google Earth) .....	54
<b>Obrázek 10:</b> snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Pogeevskaya, výška pohledu cca 3,65 km (Google Earth) .....	54
<b>Obrázek 11:</b> snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Rarau, výška pohledu cca 3,49 km (Google Earth) .....	55
<b>Obrázek 12:</b> snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Varful Omu, výška pohledu cca 3,21 km (Google Earth) .....	55
<b>Obrázek 13:</b> Průměrná teplota nejteplejšího měsíce ( $T_{NEJTEP}$ ) na HHL ve studovaných karpatských oblastech.....	61
<b>Obrázek 14:</b> Průměrná teplota nejteplejšího období ( $T_{ČER-ZÁŘ}$ ) ve studovaných karpatských oblastech.....	62
<b>Obrázek 15:</b> suma teplot za souvislé období s průměrnou denní teplotou nad 0 °C (DD0) ve studovaných karpatských oblastech .....	63



## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1:</b> roční amplitudy teplot v různých nadmořských výškách vypočtené na základě dat z období 1961–1990.....	43
<b>Tabulka 2:</b> nejnižše položené HHL v rámci Karpat (dle Czajka a kol. 2015b) .....	48
<b>Tabulka 3:</b> karpatské meteorologické stanice s dostupnými daty nalezené přes server KNMI .	50
<b>Tabulka 4:</b> hodnoty sezónních vertikálních teplotních gradientů stanovené pro jednotlivé části Karpat [ $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ], dle Micu a kol. (2015).....	51
<b>Tabulka 5:</b> průměrná nadmořská výška zjištěných poloh HHL ve studovaných lokalitách, jejich vzdálenost od meteorologických stanic a zjištěná forma HHL.....	52
<b>Tabulka 6:</b> vypočítané hodnoty teplotních charakteristik ze staničních dat pro jednotlivé lokality výskytu HHL.....	56
<b>Tabulka 7:</b> vypočítané hodnoty teplotních charakteristik z databáze WorldClim (1961–1990) pro jednotlivé lokality výskytu HHL .....	58
<b>Tabulka 8:</b> porovnání průměrných hodnot teplotních charakteristik spočítaných na základě staničních dat a databáze WorldClim .....	59
<b>Tabulka 9:</b> teplotní charakteristiky některých oblastí výskytu HHL v Alpách, pohořích Střední Evropy (CENA) a Karpatech; dle Kašpar a Tremel (2016), upraveno .....	65

# 1 Úvod

Na celém světě se vyskytuje široké spektrum typů vegetačních formací. Prostorové umístění každého takového typu je přirozeně vytyčeno jeho hranicemi, tedy ekotony, kde jeden typ vegetační formace přechází v jiný. Jednou z nejzřetelnějších vegetačních hranic je horní hranice lesa (Holtmeier a Broll 2009, Körner 2007a).

Posun polohy horní hranice lesa (dále HHL) je považován za nejzřetelnější projev změny klimatu v horských oblastech (Greenwood a Jump 2014). Hranice lesa ve vysokých nadmořských výškách jsou obvykle spojovány s teplotou, jde tedy o citlivé indikátory změn klimatu (Tranquillini 1979, Holtmeier a Broll 2005). Z tohoto důvodu jsou změny v poloze a struktuře HHL studovány po celém světě. Autoři studií zabývajících se problematikou změny polohy HHL v souvislosti se změnou klimatu si kladou za cíl pochopit probíhající změny, určit důsledky a předpovědět vývoj situace do budoucna (Harsch a kol. 2009). Jelikož se klimatické změny v rámci globálního oteplování projevují nejvíce ve vysokých zeměpisných šířkách a nadmořských výškách (Solomon a kol. 2007, Holtmeier a Broll 2005), je obecně předpokládáno stoupání polohy HHL právě v důsledku globálního oteplování (Holtmeier a Broll 2005, Harsch a kol. 2009). Tento předpoklad se přirozeně vztahuje pouze k teplotně limitovaným horním hranicím lesa. V nízkých pohořích, jejichž příkladem mohou být právě Karpaty, může s postupem HHL do vyšších poloh dojít k zániku alpského vegetačního stupně (Greenwood a Jump 2014), jedná se tedy o problematiku úzce spjatou s ochranou přírody.

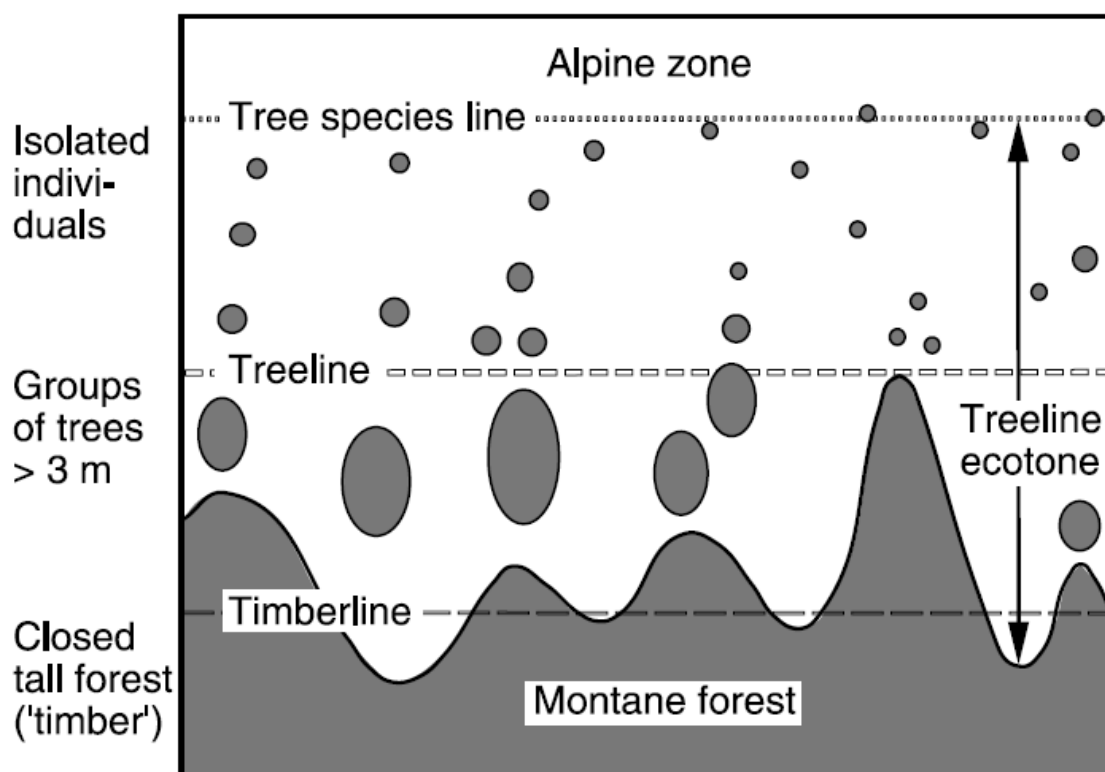
Hlavním přírodním faktorem ovlivňujícím vznik a existenci HHL je teplota vzduchu a půdy (Körner a Paulsen 2004). Její nejnižší hodnoty jsou spojovány zejména s vyššími nadmořskými výškami, v globálním měřítku lze trend poklesu teploty teoreticky vztáhnout i k rostoucí zeměpisné šířce. Vědecká veřejnost se dříve přikládala k teorii, že růst stromů je omezován nízkou intenzitou fotosyntézy, tj. nedostatečnou uhlíkovou bilancí. Časem však bylo zjištěno, že nejdůležitější roli sehrávají průběhy teplot, zejména během vegetačního období (Körner 1998). Nízké teploty v této části roku zamezují tvorbě rolných pletiv, a to i navzdory dostatku disponibilních živin a asimilátů, lze tedy obecně říci, že mají negativní dopad na proces tvorby dřeva (Körner 1998, Körner a Paulsen 2004, Holtmeier a Broll 2005, Körner 2012). Na základě pozorování současných HHL lze prostřednictvím znalostí některých teplotních charakteristik poměrně přesně předpovědět jejich polohu a její případný posun (Paulsen a Körner 2014). Zjištěním teplotních parametrů panujících v oblastech HHL je možné stanovit, na kolik se hranice lesa blíží své potenciální – teplotně-limitované pozici (Paulsen a Körner 2014, Kašpar a Tremel

2016). Teplota je tedy v současné době považována za nejdůležitější faktor ovlivňující polohu HHL (Körner 2007b), ačkoliv nezanedbatelnou měrou se podílejí i další činitelé. Kromě přírodních podmínek sehrává v některých oblastech důležitou úlohu i antropogenní činnost (např. Weisberg a kol. 2013, Motta a kol. 2006, Gehrig-Fasel a kol. 2007, Ameztegui a kol. 2010). Právě karpatská oblast je pod dlouhodobým vlivem lidských aktivit, jejichž míra vedla k výraznému snižování HHL v minulosti (Munteanu a kol. 2014). V některých oblastech vliv způsobu využití krajiny člověkem však přetrvává i dnes (Sitko a Troll 2008). Zobecněně lze postup HHL vztáhnout ke změnám klimatu i využití krajiny. Efekt kombinace těchto dvou faktorů vzhledem k postupu HHL však stále není úplně objasněn (Ameztegui a kol. 2016). Zmínění činitelé mají dopad nejen na polohu HHL, ale i na podobu celého ekotonu HHL (Harsch a Bader 2011).

Cílem této práce je na základě aktuální literatury popsat teplotní limitování a klimatické proměnné charakterizující ekoton HHL. V praktické části bylo úkolem vyhledat nejvyšší polohy HHL ve vybraných oblastech Karpat a pro tyto lokality následně z dostupných dat nejbližších meteorologických stanic zjistit některé základní teplotní charakteristiky. Následně jsou diskutovány nejen odlišnosti teplotních vlastností a charakteru HHL na území Karpat vzhledem k dalším evropským pohořím, ale i spolehlivost zpracovávaných klimatických dat, jež pocházejí z různých zdrojů.

## 2 Definice pojmu horní hranice lesa

Přesná definice pojmu HHL není v literatuře zcela jednotná. Konvenčně je však definována prudkým poklesem výšky stromů a zápoje stromových porostů na gradientu nadmořské výšky (Körner 2012). V některých oblastech může s rostoucí nadmořskou výškou postupně narůstat i zastoupení klečových forem dřevin (Holtmeier a Broll 2009), což na některých HHL může vést ke vzniku klečového stupně. Například Paulsen a Körner (2014) definují teplotně limitovanou HHL jako přirozenou hranici, která probíhá mezi oblastmi s alpinskou a polární tundrou a montánním či boreálním lesem, přičemž tato definice je aplikovatelná celosvětově. Přívlastek „teplotně limitovaná“ poukazuje na fakt, že tento typ HHL a jeho dynamika závisí především na teplotních podmínkách v dané lokalitě. Körner (2012) uvádí, že hranice lesa je linií, na níž je růst stromů omezován krátkým vegetačním obdobím, nízkými teplotami během něj, popř. kombinací těchto dvou faktorů. Podle nejčastější definice lze HHL definovat jako oblast, kde zapojený les přechází v bezlesé horské travnaté plochy (Körner 2007a). Vzniká tak přechodová zóna (ekoton) HHL (Körner a Paulsen 2004). Zhruba středem tohoto pásma ekotonu probíhá mezi horním limitem zapojeného lesa (timberline) a linií nejvýše rostoucích jedinců stromových druhů (tree species line) tzv. treeline (horní hranice stromu), jak je patrné z Obrázku 1. Podle stejných autorů může být pojmenování tohoto fenoménu (*treeline*) poněkud matoucí, neboť se ve skutečnosti nejedná o lineární prvek, nýbrž o zmíněnou přechodovou oblast – ekoton. Termín treeline se často ztotožňuje s celou přechodovou zónou – ekotonem HHL (Körner 2012).



Obrázek 1: schematické znázornění ekotonu horní hranice lesa (Körner a Paulsen 2004).

Plesník (1971), ale později např. i Holtmeier a Broll (2005) dělí přirozenou hranici lesa na tři typy. Prvním z nich je typ **klimatický**, jemuž je věnována podstatná část této práce. Jeho variantami jsou *tepelná* hranice, čili teplotně limitovaná, a hranice *větrná*. Druhým typem je hranice **orografická**, příčinou jejího vzniku jsou rozličné skalní a geomorfologické útvary. Existence **edafické** hranice lesa, jako poslední z Plesníkem (1971) uváděných typů HHL, je spjata s půdními poměry v oblasti.

V rámci vymezení pojmu HHL je bezpochyby důležité definovat i samotnou životní formu stromu. Různí autoři k tomuto přistupují odlišně, např. Körner (1998, 2012) stromy definuje jako dřeviny s dominantním vzpřímeným nadzemním kmenem, přičemž jejich vzrůst přesahuje hranici 3 metrů výšky. Hlavní charakteristikou stromu je podle Körnera (2007a) právě vzrůst. Díky němu je strom přímo ovlivňován meteorologickými jevy, především teplotou volné atmosféry, což ho primárně odlišuje od všech ostatních rostlinných forem. Vedle názoru na přesně stanovenou výšku, kterou by měl strom mít, existuje řada dalších pohledů. Např. Holtmeier (2009) uvádí, že výška stromu by měla být především větší, než je průměrná výška sněhové pokrývky v konkrétní oblasti. Souvisí to s tím, že stromy nepřesahující svou výškou výšku sněhové pokrývky, jsou sněhem během zimního období dobře chráněny. Jedinci

vyčnívající nad vrstvu sněhu bývají naopak vystaveni drsným klimatickým podmínkám a meteorologickým jevům, díky čemuž jim však podle Körnera (2012) přísluší status stromu jako takového. Vědecká společnost se neřídka zabývá i tím, zda jsou stromy k tomu, aby snášely drsné horské podmínky, vybaveny lépe než ostatní rostliny. Podle Körnera (2012) stojí za úspěchem uchycení stromových forem mezi ostatními rostlinami především jejich výrazná převaha v soutěži o světlo. Ačkoliv Körner (2007a) pojednává o zapojeném lese jako o porostu stromů, konkrétní definici zápoje jako takového on ani další autoři nenabízí.

### 3 Limitující mechanismy a formy horní hranice lesa

Lokalizace HHL je výsledkem kombinace mnoha faktorů, jež mají vliv na podmínky na konkrétním stanovišti. Růst stromů, jejich regenerace a přežití jsou procesy, které s těmito podmínkami velmi úzce souvisejí, a na nichž celá problematika existence HHL stojí (Körner 2012). Velice důležitým faktorem v přístupu k problematice vývoje polohy HHL je volba vhodného měřítka, ve kterém je na formování HHL pohlíženo (úroveň lokální, regionální, globální) [Holtmeier a Broll 2009]. Přílišné zobecňování v pohledu na vývoj polohy HHL v globálním měřítku bez přihlédnutí k lokálním charakteristikám může podle Körnera a Paulsena (2004) vést k přeceňování teplotních faktorů. Vedle přírodních podmínek, k nimž lze kromě průběhu teplot řadit mj. i rozložení srážek, rychlost větru, charakter podloží, expozici a další, hraje zásadní roli i vliv člověka, konkrétně využití krajiny. Na základě Feurdean a kol. (2015) a Weisberga a kol. (2013) lze tvrdit, že pokud by způsob a rozsah využití krajiny byl zachován, poloha HHL by do vyšších nadmořských výšek nepostupovala, i kdyby k tomu existovaly vhodné klimatické podmínky. Čili poloha HHL je schopna v pozitivním slova smyslu reagovat na změnu klimatu pouze v případě, je-li v jejím okolí způsob využití krajiny příznivý pro její postup. Toto platí i obráceně, tedy na změnu míry lidské činnosti, popř. její omezení, je HHL lesa schopna pozitivní odezvy, ve smyslu postupu do vyšších nadmořských výšek, pouze v případě příznivých klimatických podmínek (Weisberg a kol. 2013).

Je samozřejmě důležité si uvědomit, že citlivost HHL na změny prostředí se regionálně liší, vliv může mít např. druhová skladba a struktura ekotonu (Holtmeier a Broll 2009, Weisberg a kol. 2013) nebo topografie oblasti (Holtmeier a Broll 2005). Tito lokální činitelé mohou mít na podobu HHL často výraznější vliv než samotné podnebí (Holtmeier a Broll 2005, Elliot 2011, Mamet a Kershaw 2013). V případě častých disturbancí mohou hranice lesa (např. orografické) na změny klimatu reagovat velice nevýrazně nebo dokonce vůbec (Feurdean a kol. 2016, Holtmeier a Broll 2005).

#### 3.1 Limitující mechanismy polohy horní hranici lesa

V celosvětovém měřítku je poloha HHL určována minimálními teplotami během vegetačního období a jeho minimální délkou trvání, která ještě umožňuje existenci životní formy stromu (Paulsen a Körner 2014). V měřítku regionálním a lokálním je pak poloha a podoba HHL modifikována mírou ztrát biomasy a mortalitou semenáčků (Harsch a Bader 2011). Existence HHL je podle autorek výsledkem působení tří základních mechanismů. Klasifikují je na

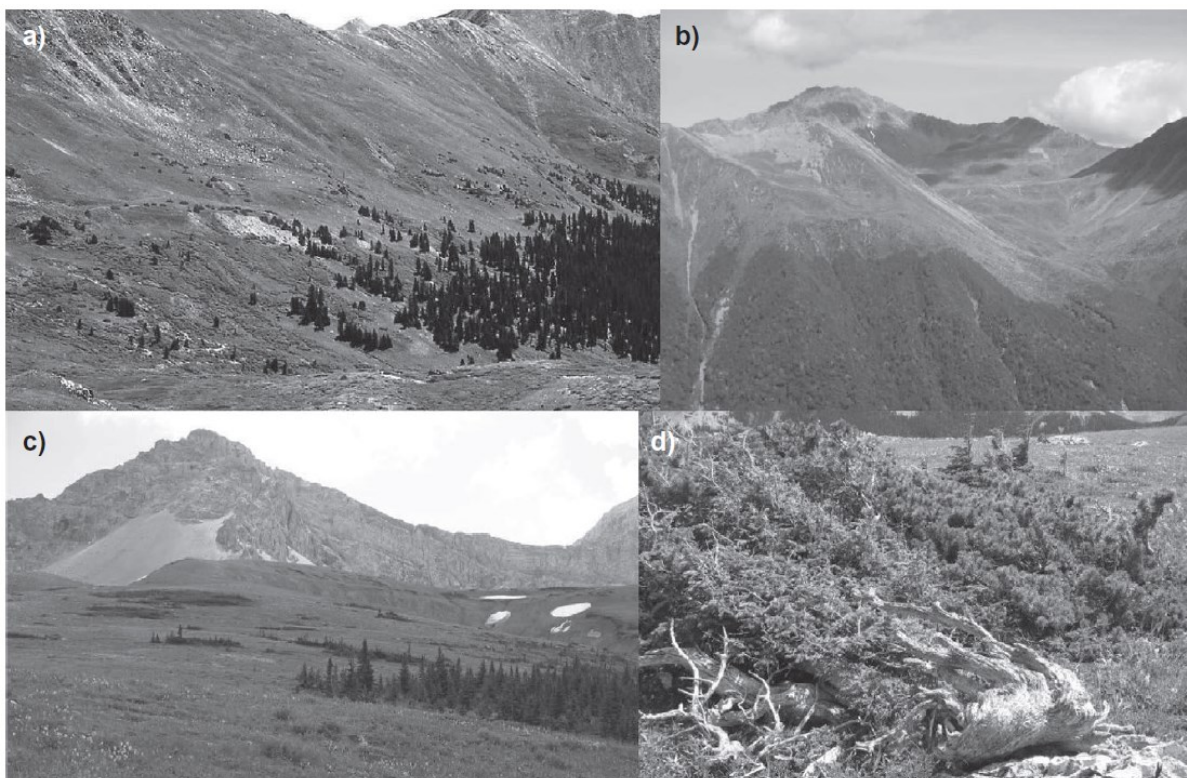
faktory prvního řádu: omezení růstu (*growth limitation*), tj. schopnost tvorby nové biomasy, ztráta biomasy (*dieback*) a úmrtnost semenáčků (*seedling mortality*). Podle Körnera (2012) poloha HHL reflektuje klimatem řízenou rovnováhu mezi úmrtností a růstem. Všechny výše uvedené mechanismy prvního řádu jsou dále ovlivňovány faktory druhého řádu, jež jsou zastoupeny různými typy fyziologického poškození a stresů, mezi něž patří např. mrazové vysychání, nedostatečná uhlíková bilance, nízké teploty, poškození sněhem nebo plísňe napadající především semenáčky a způsobující jejich zvýšenou úmrtnost. V poslední řadě autorky předkládají příklady podmínek třetího řádu, které dále modifikují druhořadové faktory. Jsou shrnuty jako interakce se sousedními stromy (kompetice, facilitace). V tomto, posledním řádu, je zahrnut také vliv mikroklimatu, půdy, větru (návětrný nebo závětrný svah), sněhu, stínění apod. (Harsch a Bader 2011).

### 3.2 Podoby horní hranice lesa

Na charakteru HHL se tedy podílí primárně její lokalizace. Ta se na první pohled může odrážet v rozsáhlosti ekotonu, tj. jeho šířce, a v jeho formě. Ve vysokých zeměpisných šířkách v subarktických oblastech, kde se HHL přirozeně vyskytuje v poměrně nízkých nadmořských výškách, se může přechodová zóna hranice lesa rozkládat i na několika stech kilometrech. V těchto oblastech se však již nejedná o HHL, ale o polární hranici lesa. Vedle toho v horských oblastech je pásmo HHL nesrovnatelně užší – jeho šířka většinou nepřesahuje pár set metrů (Holtmeier a Broll 2009).

Podle Harsch a Bader (2011) lze na základě převládajícího limitujícího mechanismu rozlišit několik forem HHL (Obrázek 2). Autorky samy rozlišují čtyři globálně rozšířené formy HHL, nicméně připouštějí, že jde o velmi subjektivní rozdělení, a že v klasifikaci forem HHL panují časté neshody. Definují hranici rozptýlenou (*diffuse*), jež je charakteristická postupným rozvolňováním zápoje, snižováním hustoty porostu a výšky jedinců až k bezlesí, ostrou (*abrupt*), pro níž je příznačné těsné sousedství zapojeného lesa tvořeného plně vzrostlými stromy a nízké alpinské vegetace, ostrovní (*island*), v rámci níž se tvoří typické ostrůvky stromového porostu nad hranicí zapojeného lesa, a klečovou (*krummholz*), ve které jsou zastoupeny zakrslé stromové druhy nebo dřeviny deformované drsnými podmínkami – tito modifikovaní jedinci se mohou vyskytovat taktéž v ostrůvcích nad hranicí zapojeného lesa, podobně jako u předchozí formy.





Obrázek 2: Příklady forem horní hranice lesa  
 (a) rozptýlená, (b) ostrá, (c) klečový stupěň, (d) klečový stupeň, bližší pohled (převažující směr větru zprava doleva) [Harsch a Bader 2011]

Je důležité nezapomenout, že při utváření HHL působí vždy všechny tři mechanismy (omezení růstu, ztráta biomasy, úmrtnost semenáčků). Samotná forma ekotonu HHL závisí na tom, který z mechanismů v konkrétní oblasti dominuje (Harsch a Bader 2011). Na základě Harsch a Bader (2011) lze jednotlivé formy stručně charakterizovat takto:

- **Rozptýlená (difúzní) hranice lesa** patří mezi nejstudovanější formy HHL na světě. Je modifikována zejména prvním mechanismem, tj. omezením růstu (*growth limitation*). Už z toho vyplývá, že pro tento typ hranice je charakteristický postupně zmenšující se vzrůst stromů s rostoucí nadmořskou výškou. Hlavním faktorem podmiňujícím omezení růstu jsou nízké teploty během vegetačního období. Z toho důvodu tato forma HHL nejzřetelněji reaguje na změnu klimatu spojenou s rostoucími teplotami. S oteplováním klimatu lze tedy předpokládat její postup do vyšších poloh. Zbývající dva mechanismy (ztráta biomasy a úmrtnost semenáčků) v utváření této formy HHL sice nehrají tak významnou roli, nicméně jsou důležité. Jejich působení zapříčiňuje pokles hustoty porostu, jenž je patrný ve většině rozptýlených (přechodných) hranicích lesa. Rozvolněnější zápoj v hranicích lesa

tvořených světlomilnými druhy, např. zástupci rodu *Pinus* nebo *Larix*, může být výsledkem negativní interakce (kompetice) mezi jedinci. Důvodem může být soutěž o vhodné životní podmínky, v tomto případě o dostatek světla. Kvůli menšímu vlivu zbylých dvou mechanismů chybí v oblastech HHL formujících rozptýlenou hranici klečový stupeň nebo výrazný vegetační ostrý práh.

- Většina **hranic lesa s ostrou přechodovou zónou** je považovaná za málo teplotně-limitované, je ale nutné mít na paměti, že disturbance nejsou jediným důvodem jejich vzniku. Ostrá hranice lesa je formována převládajícím vlivem úmrtnosti semenáčků (*seedling mortality*). Velkou roli ve fungování tohoto mechanismu sehrávají silný vítr, mráz nebo sucho. Vliv omezení růstu zde nevyniká, neboť stromy utvářející tuto formu HHL často dosahují vysokého vzrůstu. Z výsledků výzkumu autorek vyplynulo, že poměrně velká část těchto HHL je formována listnatými stálezelenými lesy. Skutečnost, že jsou tyto druhy citlivé na mráz, vede k odůvodnění toho, proč je zrovna úmrtnost semenáčků při formování ostré hranice lesa převládajícím mechanismem. Jedinci rostoucí v této formaci jsou, na rozdíl od předchozí formy HHL, poměrně závislí na svém blízkém okolí, velmi významná je zde facilitace. Přítomnost sousedních stromů umožňuje ochranu před drsnými klimatickými podmínkami. Nad samotnou HHL prudce narůstá úmrtnost semenáčků, neboť nad touto hranicí nejsou k dispozici vzrostlé stromy, které by jim ochranu mohly poskytnout.
- **Ostrovní hranice lesa** jsou nejméně častou formou. Klíčovým faktorem ovlivňujícím její vznik je vítr. Ten je spojen s mechanismem posledním, tj. ztrátou biomasy (*dieback*). V ostrůvcích lesa, jež stromy vytvářejí, je patrný trend nárůstu jejich výšky ve směru převládajícího větru. Největší míra ztráty biomasy je pochopitelně na návětrné straně těchto ostrovních formací. Působení větru může vést ke vzniku vlajkových forem stromu.
- **Klečový stupeň** je zvláštním případem. Autorky upozorňují na problematický přístup k jeho řazení mezi možné formy HHL. Je to způsobeno samotnou definicí stromu, neboť jedinci utvářející klečový stupeň často nedosahují potřebné výšky. Pro tuto formu HHL je charakteristickým dominujícím efektem ztráta biomasy (*dieback*). Vyskytuje se v oblastech s vysokými rychlostmi větru. Teplotní limitování při utváření této formy HHL nehraje až tak významnou roli, nicméně vliv jeho působení

není zcela bezvýznamný (Treml a Veblen 2017). Autoři ve své studii zjistili, že klečový stupeň z teplotního hlediska limitován je, a to především délkou vegetačního období. Podle Körnera (2012) však stromům v těchto oblastech teplotní poměry většinou růst do výšky umožňují, ten je ale většinou limitován jinými klimatickými faktory, často právě větrnými podmínkami. Z toho vyplývá relativní netečnost této formy HHL vůči klimatickým změnám (tj. rostoucím teplotám). Shrnutím může být to, že výskyt klečového stupně značí možnou existenci lesa v dané oblasti, kdyby klimatické podmínky (např. snížení rychlosti větru, nižší sněhová pokrývka) umožnily vyrůst stromům do dostatečné výšky (Körner 2012).

Jak je patrné z charakteristik jednotlivých forem HHL, reakce na klimatické změny jsou závislé i na podobě samotného lesa, jak mj. tvrdí i Harsch a kol. (2009) nebo Treml a Veblen (2017). Na konec lze pro stručné porovnání forem HHL uvést, že formy ovlivňované teplotou (tj. difuzní hranice lesa) na rostoucí teploty spojené se změnou podnebí reagují a mohou postupovat do vyšších nadmořských výšek, zatímco zbylé formy HHL utvářené působením různých mechanismů budou k teplotním změnám klimatu v podstatě netečné (Harsch a Bader 2011). Autorky také uvádějí, že podoba HHL silně závisí i na nárocích a vlastnostech druhů, kterými jsou formovány. Podobného názoru jsou i Treml a Veblen (2017), kteří na základě výsledků své studie tvrdí, že je důležité hledět při odhadování postupu HHL do vyšších poloh vedle formy HHL i na její druhové složení. Harsch a Bader (2011) na základě dřívějších studií dalších autorů upozorňují, že všechny definované formy HHL se mohou nacházet v poměrně malé oblasti současně – nejen v rámci jednoho horského celku, ale i na stejném svahu. Tato skutečnost je ovlivněna lokálními rozdíly klimatických podmínek, v expozici, druhu dřeviny, kvalitě substrátu, intenzitě a vlivu lidské činnosti nebo frekvencí dalších disturbancí (Lloyd 2005, Holtmeier 2009, Harsch a Bader 2011).

## 4 Faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa

HHL a její forma jsou utvářeny řadou faktorů. V několika posledních letech je diskuze ohledně proměn poloh HHL zaměřena především na dopady klimatických změn (Tasser a kol. 2016), neboť právě ty hrají v několika uplynulých desetiletích nejvýznamnější roli (Harsch a kol. 2009). Podle mnoha autorů (např. Wallentin a kol. 2008, Weisberg a kol. 2013, Feurdean a kol. 2016, Treml a kol. 2016, Kašpar a Treml 2016) je však velice důležité brát v úvahu kromě změn klimatu i způsob využití krajiny, a to nejen v současnosti, ale i v dobách minulých. V obecné rovině a měřítku je podle Weisberga a kol. (2013) zásadní chápat vznik a vlastnosti HHL jako výsledek interakce mezi klimatickými změnami a landuse. Podle něj je pochopení kulturních vlivů klíčové ke správnému porozumění formování a odezvy horských HHL na měnící se podnebí. Vedle tohoto existují názory, že klimatické podmínky mohou mít po lokálních charakteristikách oblasti (topografie, landuse apod.) až druhotnou roli (Elliot 2011, Motta a kol. 2006).

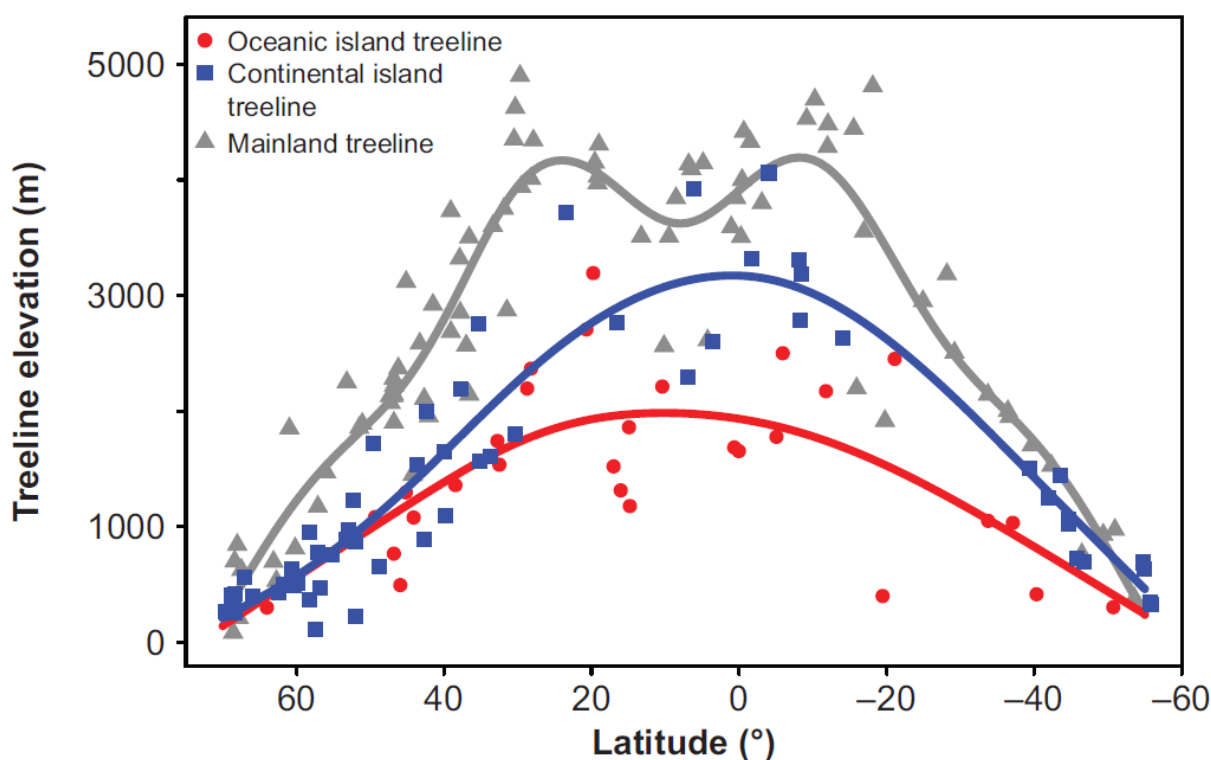
### 4.1 Přírodní faktory

Přírodní podmínky často ovlivňují existenci, formování a vlastnosti HHL největší měrou. Ve většině oblastí, a to platí vesměs celosvětově, hraje nejvýznamnější roli teplota. Ačkoliv existuje evidentní trend snižování teplot s rostoucí zeměpisnou šířkou, Körner (1998) upozorňuje na problém korelace teploty a vzdálenosti od rovníku. Tato závislost totiž není aplikovatelná zcela univerzálně, neboť do hry vstupuje mnoho dalších činitelů menších prostorových měřítek. Důkazem může být mimo jiné i to, že se na stejných zeměpisných šířkách severní a jižní polokoule liší nadmořské výšky polohy HHL (průměrně se na severní hemisféře poloha HHL vyskytuje výše). Skrze tento fakt poukazují Körner (1998) a Jobbágy a Jackson (2000) na problém některých dřívějších studií, v nichž byly teplotní charakteristiky často nahrazovány právě zeměpisnou šířkou, především kvůli snazší dostupnosti dat. Czajka a kol. (2015b) přisuzuje vedle vzdálenosti od rovníku roli i zeměpisné délce. Ta má v některých případech samozřejmě bezprostřední vliv na kontinentalitu podnebí, jež svým průběhem teplot přímo ovlivňuje polohu HHL. Proto může být tento aspekt pro evropská a asijská pohoří probíhající v západo-východním směru poměrně důležitý (Czajka a kol. 2015b).

Důležitým prvkem hrajícím roli v poloze HHL je tzv. **mass elevation effect (MEE)**, česky někdy též zvaný jako **efekt hmotnatosti pohoří**. Zjednodušeně ho lze popsat jako vliv rozlehlosti a hmoty geomorfologických celků na polohu HHL, přičemž jeho principem je rostoucí schopnost retence tepla s rostoucí rozlehlostí celku, popř. výraznější vliv velkých horských celků na

proudění vzduchu. S tím dále souvisí rostoucí míra kontinentality v centrálních částech rozlehlých pohoří. MEE lze velmi dobře rozpoznat v případě, kdy je nadmořská výška polohy HHL v centrální oblasti horstva o poznání vyšší než průměrná nadmořská výška HHL v rámci celého horského celku (Körner 2012).

Oba zmíněné faktory – MEE i míra kontinentality rostoucí se vzdáleností od moře – pozitivně ovlivňují nadmořskou výšku polohy HHL. Z definice pojmu vyplývá, že nejvýznamnější vliv má MEE v horských oblastech na pevnině, kdežto na maloplošných odlehlých ostrovech bude jeho vliv o mnoho menší (Irl a kol. 2015). I z tohoto důvodu se HHL obecně vyskytuje na pevnině výše než na ostrovech. V globálním měřítku je MEE hlavním faktorem ovlivňující polohu HHL na ostrovech (Irl a kol. 2015). S MEE souvisí Obrázek 3, z nějž je patrné rozložení nadmořských výšek HHL na Zemi v závislosti na zeměpisné šířce.



Obrázek 3: globální rozložení nadmořských výšek HHL na pevnině a oceánských a šelfových ostrovech v závislosti na zeměpisné šířce (Irl a kol. 2015)

U křivky reprezentující výšku hranic lesa vyskytujících se na pevnině je, na rozdíl od křivek zastupujících polohy HHL na ostrovech, zjevné bimodální rozložení. Dvě maxima připadající na obratníkové oblasti symbolizují vedle vyšších teplotních maxim, tedy charakteristického typu podnebí, i velký vliv právě MEE. Křivky pro oceánské a šelfové ostrovy

disponují maximem pouze jedním, a to rovníkových oblastech – roli zde hrají tedy především nižší zeměpisné šířky a s nimi spojené vyšší teploty. Na základě odlišného průběhu křivek je poměrně dobře možné interpretovat základní rozdíl mezi polohou HHL na ostrovech a kontinentech. Maxima ostrovních hranic lesa se nacházejí v tropech, zatímco hranice lesa pevninské dosahují největších výšek na úrovni vyšších zeměpisných šířek, tj. v subtropích a tropech (Irl a kol. 2015). Podoba křivky symbolizující polohu HHL na pevnině je, zejména v oblasti jejího prvního vrcholu na severní polokouli, modelována především existencí rozsáhlých a vysokých pohoří střední Asie. Dobrým příkladem je Tibetská plošina, v jejíž oblasti je patrný vliv MEE. Poloha HHL se se tu díky tomuto fenoménu vyskytuje o téměř 2 km výše, než by tomu teoreticky mělo být, pokud bychom uvažovali pouze vliv zeměpisné šířky (Zhao a kol. 2014). S podobným projevem MEE se lze setkat mnohem blíže, např. v Alpách. Na čelních vápencových částech pohoří se ekoton HHL vyskytuje kolem 1 600 m n. m., u Innsbrucku v oblasti za čelními hřebeny dosahuje už 2 000 m n. m. a v centrálních švýcarských Alpách nacházíme HHL ve výšce kolem 2 350 m n. m. (Körner 2012). Stejně tak na jihoamerickém kontinentu nejsou nejvýše položené HHL (kolem 4 810 m n. m., Bolívie) ovlivňovány snad výjimečnou odolností jedinců druhů *Polylepis*, jenž ekoton v této oblasti tvoří, nýbrž právě výrazným efektem hmotnatosti pohoří (Körner 2012). Tato oblast je společně s Tibetskými svahy Himalájí místem nejvyšších nadmořských výšek HHL na Zemi. HHL se zde vyskytují ve výškách 4 800–4 900 m n. m., což je o více než 1 km výše, než v rovníkových oblastech (Körner 2012).

V ostrovních oblastech je stanovování polohy HHL poněkud složitější záležitostí, jelikož nezávisí tak výrazně pouze na teplotě, jak je tomu většinou u pevninských HHL. Přes tento rozdíl však efekt zeměpisné šířky, a tedy i teploty, zůstává nejdůležitějším determinantem. Vliv má dále i typ ostrova (šelfový/vulkanického původu), jelikož do jisté míry předurčuje lokální charakteristiky, jež mají pochopitelně, podobně jako u oblastí HHL na pevnině, velmi důležitou roli. K těmto vlastnostem se řadí např. stáří a rozloha ostrova, druhová rozmanitost flory (většinou o poznání menší než na pevnině, Körner 2012) nebo maximální nadmořská výška ostrova (Irl a kol. 2015). Všechny vyjmenované faktory mají pozitivní vliv na polohu HHL. Znamená to tedy, že čím starší a rozlehlejší ostrov je a čím vyšší nadmořské výšky dosahuje jeho nejvyšší bod, tím výše se HHL vyskytuje (Irl a kol. 2015).

V návaznosti na problematiku vlivu nejvyšší nadmořské výšky konkrétního vrcholu na polohu HHL je vhodné zmínit ještě tzv. **summit syndrome**, do češtiny přeložitelný jako **vrcholový fenomén**. Körner (2012) staví tento fenomén v podstatě do opozice vůči MEE. Uvádí, že předpokladem pro existenci klimatického typu HHL je dostatečná výška daného vrcholu.

Principem tohoto jevu je neschopnost uchycení lesa kvůli přetrvávání drsných klimatických podmínek, především extrémních rychlostí větru (Körner 2012, Kašpar a kol. 2017) a špatná kvalita půdy, popř. její úplná absence (Kašpar a Tremel 2016). Tyto faktory neumožňují růst stromů, tedy ani vznik HHL, ačkoliv teplotní podmínky pro její výskyt jsou splněny (Holtmeier 2009, Takahashi 2014). Příkladem oblasti s typickými projevy vrcholového fenoménu mohou být francouzské Vogézy – HHL se zde vyskytuje o 300–500 metrů níže, než by odpovídalo průběhu teplot. Působí zde silné západní proudění, jež znemožňuje růst stromů (Körner 2012). S obdobnou situací působení vrcholového fenoménu se lze setkat i na jiných světadílech. Na severojaponských ostrovech je výskyt lesa rovněž posunut až o 500 výškových metrů níže vlivem velmi silných větrů a vysoké sněhové pokrývky (Takahashi 2014). Körner (2012) pro srovnání dále uvádí příklad Apalačského pohoří a horských vrcholů na Sumatře či Borneu. Zde je však nižší poloha HHL zapříčiněna především nedostatečně vyvinutou půdou ve vyšších nadmořských výškách.

Kašpar a Tremel (2016) na základě několika dalších autorů uvádějí, že v obecné rovině v regionálním měřítku jsou nejvýše položená místa výskytu stromů ve skutečnosti níže, než by mohla být. Teplota však v těchto oblastech nebývá tím nejvýznamnějším činitelem, který omezuje růst stromů. Roli v takových oblastech hrají zmíněné sekundární faktory (Kapitola 3.1). Tyto místní nepříznivé podmínky mají za následek zvýšenou míru odumírání porostu, a především tvorbu překážek a zábran pro uchycení mladých semenáčků (Harsch a Bader 2011). Příkladem takovýchto oblastí na evropském území může být řada středoevropských pohoří, z nichž lze zmínit např. Krkonoše, Králický Sněžník nebo pohoří Hrubého Jeseníku (Kašpar a Tremel 2016).

#### **4.1.1 Teploty na horní hranici lesa**

Z teplotního hlediska jsou v rámci problematiky polohy HHL studovány teploty vzduchu a půdy, neboť ty korelují s teplotami dělivých pletiv stromů (Körner 2012). Nad úrovní HHL není kvůli příliš nízkým teplotám možná dostatečná tvorba dřeva, která by existenci stromové formy umožňovala (Körner 2012). Ve spojitosti s teplotou je v daném tématu pochopitelná i souvislost s průběhem izoterm.

Zaměříme-li se na klimatický typ HHL, je z přívlastku patrné, že její poloha bude ovlivňována především podnebím panujícím v dané oblasti. Na polohu tohoto typu HHL má největší vliv teplota, resp. nedostatek tepla, jenž se zvyšuje s rostoucí nadmořskou výškou a zeměpisnou šířkou. Vzhledem k charakteru těchto dvou ovlivňujících faktorů lze tento princip

v obecné rovině aplikovat celosvětově (Holtmeier a Broll 2009). S teplotou je úzce spjato i globální oteplování, které se nejvýrazněji projevuje ve vysokých zeměpisných šířkách a vysokých nadmořských výškách (Solomon a kol. 2007). Autoři některých starších studií (Jobbágy a Jackson 2000) připisovali průměrné roční teplotě větší váhu než sezónní amplitudě teplot. V současné době se však vědecká společnost přiklání k větší důležitosti průběhu teplot během vegetačního období. Průměrná roční teplota je biologicky bezvýznamná, neboť pro jedince adaptované na klimatické podmínky v oblastech výskytu klimatické HHL nejsou extrémní nízké teploty příliš důležité (Körner 2012).

Podle Holtmeier a Broll (2009) bývá poloha HHL nejčastěji připisována specifickým izotermám, jež ovlivňují růst stromů. Toto potvrzují Kašpar a Trembl (2016), kteří poukazují na vzrůstající nadmořskou výšku HHL v západovýchodním směru v rámci středoevropských pohoří. Autoři ve své studii zjistili, že posun maximálních poloh HHL mezi 10° a 20° východní délky činí zhruba 94 m na 100 km. Tento jev je způsoben posunem izoterm vegetačního období spjatým se zvyšující se mírou kontinentality a výraznějším efektem hmotnosti pohoří (Kašpar a Trembl 2016). V minulosti byla poloha HHL spojována s průběhem 10°C izotermie teploty vzduchu v nejteplejším měsíci (Migala 2005). Později bylo od této hypotézy však upuštěno, neb vyšla najevo její neaplikovatelnost v globálním měřítku (Körner 1998).

Pro výskyt HHL je limitujícím faktorem tedy teplota vzduchu během vegetačního období. Körner a Paulsen (2004) vymezují vegetační období jako dobu začínající týdnem, jehož průměrná teplota vzduchu překročí hranici 0 °C. Končí pak v týdnu, jehož průměrné teploty vzduchu klesnou pod bod mrazu. Důležitou roli však hrají i půdní teploty. Pro teplotu půdy je hraniční hodnotou stanovena teplota 3,2 °C v 10 cm hloubky (Körner a Paulsen 2004). Půdní teplotní poměry jsou ukazatelem spolehlivějším, velkou jejich nevýhodou je však fakt, že nejsou měřeny meteorologicky (Körner 2012). Gehrig-Fasel a kol. (2008) ve své studii však přicházejí s algoritmy, jež umožňují výpočet teploty půdy z teplotních dat vzduchu. Jako celosvětově aplikovatelný teplotní práh byla zjištěna hodnota průměrné denní teploty pro obě prostředí, přičemž pro vzduch je tato hranice 5 °C, pro půdu v hloubce 10 cm pak 6,7 °C ± 0,8 SD (Körner a Paulsen 2004). Je nutné podotknout, že porovnávání průběhů teplot půdy z různých oblastí je značně problematické, neboť u půd hrají nezanedbatelnou roli i další její vlastnosti – např. její vlhkost nebo textura (Holtmeier 2009). Je obecně známo, že při teplotách nižších než 5 °C, jsou značně zpomalovány biochemické procesy (Holtmeier a Broll 2009, Körner 2012). Podle Körnera (2012) je pro dřeviny vysokého vzrůstu nutné, aby vegetační období trvalo bez přerušení alespoň 94 dní, a aby jeho průměrné denní teploty přesahovaly práh 0,9 °C. Znalost teplotních poměrů



panujících v oblastech HHL otevírá dveře k nalezení vhodných teplotních indikátorů, díky nimž lze určit nejnížší teploty, které podmiňují výskyt HHL. Dříve se mělo za to, že některé vrcholy ve středoevropských pohořích (např. Velký Javor v Bavorském lese, Fichtelberg v Krkonoších nebo Lysá hora v Beskydech) jsou vhodnými oblastmi pro existenci HHL (Jeník 1961). Právě výpočet některých teplotních charakteristik však odhalil, že tyto oblasti podmínky pro výskyt HHL zdaleka nesplňují (Kašpar a Tremel 2016). Tento příklad je dobrým pro pochopení toho, jak znalost vhodných teplotních indikátorů může pomoci při předpovědi výskytu HHL či při porovnávání situace v různých oblastech. V rámci pohoří Střední Evropy, tj. včetně Západních Karpat, pracují Kašpar a Tremel (2016) na základě předchozích studií (např. Körner a Paulsen 2004, Gehrig-Fasel a kol. 2008) s následujícími teplotními charakteristikami – průměrná teplota v období červen–září, suma teplot vyšších než 0 °C, počet dnů s průměrnou teplotou vyšší než 0,9 °C (bez sněhové pokrývky), průměrná teplota nejteplejšího měsíce, průměrná teplota období s teplotami přesahujícími 0,9 °C (bez sněhové pokrývky). Existuje však velké množství dalších teplotních indikátorů, zmiňme z nich třeba ještě minimální průměrnou teplotu vegetačního období (Körner a Paulsen 2004).

Vliv nízkých teplot má negativní dopad zejména pro růst stromů a tvorbu nového dřeva (Körner 1998, 2012, Hoch a Körner 2012). Hoch a Körner (2012) se ve své studii zabývali odpovědí na otázku, jak přesně mohou nízké teploty bránit růstu stromů, když ve stejných nadmořských výškách existují druhy keřů a trav. Tento jev je vysvětlitelný prostřednictvím několika hypotéz, z nichž zmiňme dvě důležité. Jsou jimi hypotéza nedostatečné uhlíkové bilance (*carbon limitation hypothesis*) a hypotéza omezení růstu (*growth-limitation hypothesis*).

**Hypotéza nedostatečné uhlíkové bilance** je úzce spjata s intenzitou fotosyntézy. Ta klesá s rostoucí nadmořskou výškou a klesajícími teplotami. Tyto dva jevy nevyhnutelně vedou ke zkracování vegetačního období, což se v dlouhodobém měřítku může negativně projevit na odolnosti rostlin (Körner 1998, Czajka 2015a). Při nízkých teplotách podle této teorie není rostlina schopna prostřednictvím fotosyntézy získávat dostatečné množství uhlíku k budování pletiv potřebných k růstu a reprodukci (Körner 1998, Hoch a Körner 2012). Grace a kol. (2002) zjistili, že optimální teplotou pro fotosyntetické procesy v temperátních oblastech je hranice 20 °C. Intenzita fotosyntézy, jak již bylo řečeno, klesá s teplotou. Nejedná se však o lineární průběh, při teplotě 10 °C je intenzita procesů fotosyntézy stále poměrně vysoká. Výrazněji klesá s poklesem teplot až pod 10°C hranici. Nejnížší teplotou, za níž fotosyntéza probíhá (ačkoliv je její intenzita nízká), je autory uváděna hranice 5 °C (Grace a kol. 2002), podle Körnera (2012) je však intenzita fotosyntetických procesů při této teplotě na 50–70 % své kapacity. Stromy

adaptované na chladné podmínky na HHL pak běžně při teplotách kolem 0 °C dosahují až 30 % své fotosyntetické kapacity (Körner 2012). V minulosti byla nedostatečné uhlíkové bilanci připisována významná role ohledně polohy HHL (Hertel a Schöling 2011). Nebylo však zjištěno, že by stromy v oblasti HHL v porovnání se stromy v lesích rozprostírajících se v nižších nadmořských výškách trpěly výrazným nedostatkem uhlíku (Körner 2012, Hoch a Körner 2012). I v jedné ze svých dřívějších studií Körner (2007b) předesílá, že zásoby uhlíku u stromů ekotonu HHL jsou pravděpodobně dostatečné – poloha HHL tedy není limitována intenzitou fotosyntézy (nedostatečným přísunem uhlíku), ale jinými faktory. Hoch a Körner (2012) připomínají, že byla v tělech rostlin zjištěna rostoucí koncentrace nezapojeného uhlíku s rostoucí nadmořskou výškou. Tato zjištění hrají v neprospěch teorie nedostatečné uhlíkové bilance, a naopak podporují teorii omezení růstu (dále). Jiní autoři, např. Holtmeier a Broll (2009), vedle toho připouštějí jistý význam nedostatečné uhlíkové bilance při vzniku HHL, ale předesílají, že v dlouhodobém měřítku tato teorie nemá na formování HHL vliv.

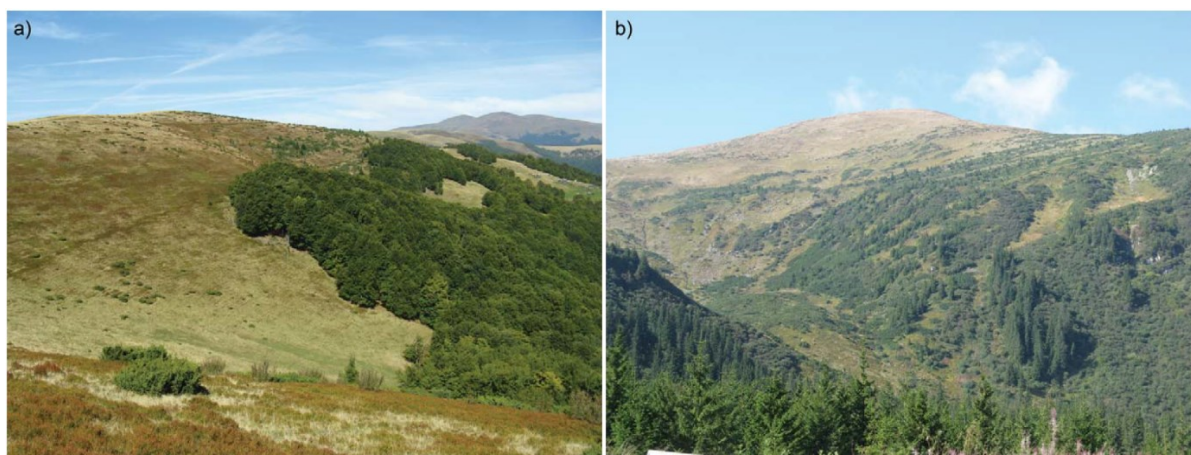
Körner (1998) navrhuje teorii, jež nesouvisí s nedostatečnými zásobami uhlíku. Jde o **hypotézu omezení růstu**. Ta vychází z jeho předpokladu existence minimální teploty, za které je ještě možná dostatečná produkce buněk dělivých pletiv vyšších rostlin. Za nízkých teplot je zpomalen nebo úplně znemožněno zapojování uhlíku do rostlinných pletiv, ačkoliv je jeho množství v těle rostliny dostatečné (Hoch a Körner 2012). Na rozdíl od předchozí teorie nejde o problém získávání uhlíku, tedy nejedná se o problém na straně jeho zdroje, nýbrž o příliš pomalou přeměnu uhlíku a živin na rostlinná pletiva, tj. jejich růst. Podle Hocha a Körnera (2012) je vznik nových buněk (např. proces buněčného dělení) mnohem více závislý na teplotě než na intenzitě fotosyntézy. Dle těchto autorů i dřívějších studií (např. Körner 2007a) je tato hypotéza nejlepší teorií, jíž lze vysvětlit příčinu vzniku HHL.

#### **4.1.2 Druhovú skladbu ekotonu horní hranice lesa a její vliv na polohu**

Výrazně se na podobě a poloze HHL podílí i druhová skladba dřevin, které ji formují (Irl a kol. 2015). Druhové složení v oblastech výskytu HHL může být vedle klimatických podmínek ovlivněno i prostou lokací na jižní či severní polokouli (Jobbágy a Jackson 2000). Podle autorů mohou někdy značné rozdíly v nadmořských výškách polohy HHL mezi severní a jižní polokoulí obecně pramenit z relativně dlouhého samostatného vývoje obou hemisfér. Navíc podle Körnera (2012) má každý druh svůj limit v podobě maximální nadmořské výšky, ve které je schopen života. Obecně platí, že s rostoucí nadmořskou výškou klesá míra biodiverzity. Existuje

asi 100 druhů stromů, které se vyskytují na horním limitu existence životní formy stromu (Körner 2012).

V nejvýše položených HHL na Zemi se na stavbě ekotonu podílejí zástupci rodu *Rosaceae* (Jižní Amerika) a *Cupressaceae* (Asie) [Körner 2012]. Zastoupení jednotlivých druhů může být ovlivněno např. preferencemi ohledně světla (stínomilné druhy, např. *Fagus sylvatica*), nebo způsobem šíření semen (např. druhy spoléhající na zoochorii, tedy pro jejichž rozmnožování je nutný dostatek semenožravých ptáků či hlodavců) [Weisberg a kol. 2013]. Převaha zástupců jehličnanů nebo listnatých stromů v ekotonu HHL může mít na jeho podobu také zásadní vliv (Shandra a kol. 2013, Weisberg a kol. 2013, Czajka a kol. 2015a). Autoři poukazují na rozdílnou formu HHL na základě různé druhové skladby. Z Obrázku 4 je patrný rozdíl mezi hranicí lesa tvořenou listnatými stromy (konkrétně buky) a HHL formovanou na kraji smrkového lesa. HHL tvořené listnatými stromy tvoří většinou ostrý přechod mezi dvěma krajinnými pokryvy, kdežto v oblastech s jehličnatými porosty se vyskytuje spíše rozptýlená (difúzní) hranice (Weisberg 2013).



Obrázek 4: snímky z ukrajinských Karpat demonstrující rozdílné formy HHL  
(a) ostrá hranice tvořena listnatými buky (*Fagus sylvatica*); (b) rozptýlená hranice jehličnatého lesa (*Picea abies*, *Pinus mugo*) [Weisberg 2013]

Mezi rozdíly listnatých a jehličnatých HHL patří i schopnost a míra odezvy na změny v jejich okolí (Czajka a kol. 2015a). Je známo, že hranice lesa tvořené listnatými druhy stromů na klimatické změny reagují méně a ještě pomaleji, než hranice lesů jehličnatých (Weisberg a kol. 2013, Shandra a kol. 2013). Piermattei a kol. (2016) vlivy rozdílů ve druhovém složení HHL předkládají ve své studii z horských oblastí Apenin. Podle nich listnaté lesy vykazují ve své poloze větší stabilitu a utvářejí tak zpravidla právě ostré formy HHL. Vedle toho hranice formované

zástupci jehličnanů tvoří difúzní HHL, což podle autorů poukazuje na tendenci k postupu polohy HHL do vyšších nadmořských výšek. V karpatském regionu mohou být důkazem odlišné reakce listnatých a jehličnatých HHL na změnu klimatu oblasti v Západních Bieszczadech a Čornohoře (Czajka a kol. 2015a). Autoři porovnáním dvou odlišných HHL zjistili, že ekoton tvořený listnatými druhy postoupil za posledních 150 let o pouhých 10 metrů výše, kdežto ekoton složený ze smrků v oblasti ukrajinské Čornohory se během uplynulých 70 let posunul do vyšších nadmořských výšek až o 80 metrů.

#### 4.1.3 Další přírodní faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa

Kromě teploty působí na HHL i mnoho dalších přírodních faktorů. Körner (2012) je dělí na disturbanční a stresové. Mezi první patří všechny procesy, při nichž je rostlina mechanicky poškozována a přichází tak o své části. Příkladem mohou být požáry, poškozování porostu zvěří, svahové procesy, výskyt lavin, silné větry, povodně a další. Využití krajiny člověkem řadí autor také do skupiny disturbančních faktorů. Do druhé kategorie spadá např. mráz, s ním spojený fotochemický stres a mrazové vysychání, sucho, teplotní extrémy, nepřiměřeně vysoká intenzita slunečního svitu apod. Patogenní vlivy, tj. procesy, do nichž jsou zapojeny houby a bakterie, staví Körner (2012) na pomyslný mezistupeň mezi stresové a disturbanční faktory.

Většina zmíněných disturbančních faktorů je silně modifikována tvarem **reliéfu** (Holtmeier a Broll 2009). Rozličné geomorfologické procesy jsou častým důvodem absence lesa v konkrétní oblasti. Skalní řícení, půdotoky, bahnotoky, suťové svahy, přítomnost skalních stěn a v neposlední řadě i lavinových drah znemožňují existenci HHL v různých nadmořských výškách (Körner 2012). Hranice lesa limitované těmito procesy nejsou klimatické, nýbrž orografické (Holtmeier a Broll 2005). Podle Holtmeiera (2009) je důležitým faktorem i **orientace svahů**. Na příkladu Alp autor uvádí rozdíl v nadmořské výšce polohy HHL kolem 100 m při porovnávání stinných a slunečnějších svahů. Problematika polohy HHL v závislosti na svahové orientaci je však poněkud složitější, neboť zde nehraje roli pouze odlišná distribuce slunečního světla, tedy tepla, ale i rozdílné rozložení vláh. To souvisí samozřejmě s výparem, ale i s množstvím sněhu (Holtmeier 2009). Mocnost a délka trvání sněhové pokrývky je nejvíce ovlivněna právě topografií. Na návětrných svazích sněhová pokrývky přirozeně nedosahuje takových mocností jako na svazích závětrných (Takahashi 2014), podobně může být na exponovaných svazích zkrácena doba trvání, po kterou sníh v oblasti leží. Pozitivem výraznější sněhové pokrývky může být dostatek vláh během tání. Negativní dopad však může mít její dlouhé působení, jež zpřičňuje zpoždění růstu půdní teploty v jarním období, tedy zkracování vegetačního období

(Vaganov a kol. 1999). V dobách velkého množství sněhu roste riziko napadení jehličnatých druhů sněžnými houbami a bakteriemi, což může být pro některé jedince fatální (Holtmeier 2009).

Jedním z vůbec nejvýznamnějších faktorů rozhodujících o poloze a vůbec existenci ekotonu HHL jsou vlastnosti **půdy** (Holtmeier 2009). Jak již bylo řečeno v kapitolách výše, nejdůležitější charakteristikou je půdní teplota. Na tu má vliv vedle podnebných podmínek mnoho půdních vlastností – např. obsah humusu, množství půdní vláhy, expozice vůči slunečnímu záření a větrným podmínkám, ale i samotná vegetace (Holtmeier 2009). Při nízkých půdních teplotách klesá obsah dusíku, který je mj. důležitý pro průběh fotosyntetických procesů, je zabraňováno dýchání kořenů, uchycování semen a růstu mladých jedinců, získávání zásob apod. (Holtmeier 2009, Sullivan a kol. 2015). O tom, zda je půda vhodná pro růst rostlin a zejména stromů, rozhoduje nepřímo i nadmořská výška. Podle Sullivana a kol. (2015) by měla být vedle průběhu teplot vzduchu a půdy věnována dostatečná pozornost i půdnímu obsahu živin, zejména v chladných oblastech s podmačenými půdami. S odkazem na další autory uvádějí, že např. v půdách chladných oblastí Aljašky je na HHL nižší obsah dusíku než v půdách v níže položených zapojených lesích. Z toho vyplývá, že utváření HHL může být kromě důležitého průběhu teplot během vegetačního období ovlivňováno i množstvím živin v půdě (Sullivan a kol. 2015).

Podle Körnera (2012) v minulosti proběhlo mnoho studií zabývajících se nalezením faktoru nejvíce ovlivňujícím polohu HHL. Uvažoval se vliv **srážek**, nicméně většina z provedených výzkumů vedla k teplotě coby nejdůležitějšímu faktoru při formování HHL. Velké množství srážek, pokud byl jejich vliv vůbec zjištěn, ovlivňuje polohu HHL spíše negativně. Neboť čím vyšší množství srážek, tím větší oblačnost, která nutně vede k nižším teplotám ve vegetačním období (Körner 2012), jež jsou pro formování HHL stěžejními. Tyto souvislosti mohou poskytnout poměrně dobré vysvětlení toho, proč se v rovníkových oblastech vyskytují HHL průměrně až o 1 000 m níže než na úrovni obratníků. Markantní rozdíly v elevacích HHL mezi rovníkovými a obratníkovými oblastmi jsou vedle výrazného MEE, jenž umožňuje lesu postupovat do vysokých nadmořských výšek v obratníkových oblastech, způsobeny právě velkým množstvím srážek na rovníku, které zde naopak brzdí postup HHL do vyšších poloh. Oblasti s nejvýše položenými HHL (vnitřní svahy Himalájí a svahy And spadající k plošině Altiplano) leží ve velmi suchých regionech s kontinentálním podnebím (Körner 2012). Množství srážek může společně s vlivem vlastností reliéfu zapříčinit fragmentaci ekotonu HHL. Stromy budou pravděpodobněji růst v blízkosti rýh a zářezů v terénu, neboť právě v nich se hromadí vlhkost (Körner 2012). Minimální roční úhrn

srážek umožňující existenci stromové vegetace na HHL autor odhaduje na 300–500 mm/rok v závislosti na makroklimatu, a s odkazem na další studie uvádí, že poloha HHL stoupá s rostoucí ariditou klimatu – tedy pochopitelně maximálně k uvedené nejnižší hodnotě ročního srážkového úhrnu. Je tedy možné na základě pouhého odhadu tvrdit, že hranice lesa jsou nejnižše položené ve vlhkých regionech, nejvýše pak v suchých (Körner 2012).

**Větrné podmínky** podobu ekotonu HHL ovlivňují také. Kašpar a kol. (2017) však na základě výsledků výzkumu vlivu větru na růst stromů v Krkonoších tvrdí, že vítr nehraje v poloze HHL až takovou roli. Poukazují na to, že se mnoho studií [např. Kullman a Öberg (2009), Takahashi (2014)], připisujících působení větru významnou roli, zabývalo oblastmi v blízkosti vrcholů, kde svou roli sehrává především vrcholový fenomén. Působení větru podmiňuje ukládání a distribuci sněhu, je taktéž důležitým prvkem při ochlazování všech organismů. Mimo teplotu je to právě vítr, od jehož intenzity a směru působení se odvíjí míra přenosu tepla z těl rostlin a živočichů do okolí (Grace a kol. 1989). Autoři ve své práci také uvádějí, že pro nízkou vegetaci (tj. i zakrslé stromy) jsou větrné podmínky téměř stejně důležité jako průběh teplot vzduchu. Mezi pozitiva působení větru na rostoucí stromy lze řadit třeba již zmíněné ochlazování povrchu listů či jehlic (Han a kol. 2012). Negativem je pak redistribuce sněhu, který se následkem větrných podmínek hromadí na závětrných stranách stromů nebo uvnitř stromových ostrůvků [ty jsou pro větrem ovlivňované HHL charakteristické (Harsch a Bader 2011)]. Následkem toho je zkracování vegetačního období (Vaganov a kol. 1999), popř. rostoucí riziko výskytu houbových onemocnění nebezpečného zejména pro mladé jedince (Senn 1999). Dlouhodobé extrémní rychlosti větru pak působí pochopitelně negativně – mohou vést k vyvracení stromů, lámání větví, opadu, vysoušení, úmrtnosti pupenů nebo deformaci stromových korun a kmenů (Han a kol. 2012, Kašpar a kol. 2017). Při rychlostech větru nad  $7 \text{ m.s}^{-1}$  (Mamet a Kershaw 2013) dochází k abrazi jehlic a kmenů stromů, zejména prostřednictvím unášeného sněhu a ledových částic (Kašpar a kol. 2017). Nicméně Körner (1998) nepředpokládá, že by tyto skutečnosti výrazně ovlivňovaly samotnou polohu HHL. Distribuce větru je často úzce spjata opět s topografií oblasti (Körner 2007a, Barry 2008). Ve vrcholových oblastech horských masivů jsou rychlosti větru topograficky urychlovány zejména nízkou mírou tření vzduchu o povrch a stlačováním a uvolňováním proudícího vzduchu přes bariéru tvořenou pohořím (Barry 2008). S tím roste riziko mechanického poškození stromu. Tyto mechanismy mohou vést ke vzniku ostrovních hranic lesa (Harsch a Bader 2011). Jindy je ale topografie pro populace stromů ochranným prvkem, jenž může systémem brázd a hřbetů těmto poškozením zabraňovat (Han a kol. 2012). Působení větru má tedy přímý vliv na vzrůst a podobu stromů (Körner 2012) a na distribuci a délku trvání

sněhové pokrývky (Holtmeier 2009). Větrné podmínky mají ve vysokých polohách vliv také na vlastnosti půdy – např. na její hloubku (Konček a kol. 1974). Působení některých těchto proměnných může mít dopad i na průběh teplot v oblasti a tím i na délku vegetačního období. Samotné vzdušné proudění však polohu HHL přímo neovlivňuje (Körner 1998).

V poloze HHL může hrát roli i okus zvířít (sobi, jeleni) nebo jiné vlivy činnosti býložravců jako je pošlapávání či zbavování kůry u vzrostlejších stromů. Takto žijící populace kopytníků mohou mít lokální vliv na omezení postupu HHL (Holtmeier 2009).

Stresové faktory jsou oproti disturbančním určovány především povětrnostními podmínkami. V důsledku různých extrémních událostí mohou rostliny čelit stresu, v důsledku čehož mohou i uhynout. Opakovaný výskyt takových událostí brání postupu HHL do vyšších nadmořských výšek (Körner 1998). Jedním z takových stresových procesů je **mrazové vysychání** (angl. *frost dessication*). Týká se lesů tvořených jehličnany (Herrick a Friedland 1991). Je nebezpečné zejména pro mladé stromky, a to hlavně na jaře (Holtmeier a Broll 2009). Mrazové vysychání je pojem označující proces, kvůli kterému může strom uschnout v zimním období. Děje se tak kombinací slunečného počasí, při němž se z jehlic stromů odpařuje voda, a stále zmrzlé půdy pod přetrvávající sněhovou pokrývkou, z níž není rostlina schopna zmrzlou vodu vstřebávat a doplňovat tak ztráty způsobené výparem (Herrick a Friedland 1991, Körner 1998).

## 4.2 Vliv využití krajiny člověkem

I přes velkou významnost popsaných přírodních faktorů sehraává v některých oblastech významnější roli vliv lidské činnosti (Körner 2007a). Diskuze problematiky vlivu využití krajiny na polohu a podobu HHL je samozřejmě opodstatněná pouze ve spojitosti s oblastmi, v nichž lidé působí. Z toho lze vyvozovat, že zabývat se využitím krajiny ohledně charakteru HHL má smysl v Africe, v některých regionech Asie, a především v Evropě (Gehrig-Fasel a kol. 2007). Většina euroasijských pohoří umožňuje studium posunu HHL jako výsledku vzájemného působení změny klimatu a využití krajiny (Camarero a Gutierrez 2004).

Ačkoliv HHL reagují na výrazné klimatické trendy (Feurdean a kol. 2015), ve většině případů je velice obtížné odlišit, zda v konkrétní oblasti hraje primární roli podnebí nebo antropogenní činnost v oblasti. Podle Czajky a kol. (2015b) jsou reakce HHL na měnící se klima maskovány právě rychle se měnícím způsobem využití krajiny. Z tohoto důvodu je důležité zabývat se interakcí těchto proměnných, není možné pohlížet na každou odděleně (Gehrig-Fasel a kol. 2007, Martazinova a kol. 2011, Weisberg a kol. 2013). Vedle toho autoři zdůrazňují, že

pochopení tohoto vzájemného působení proměňujícího se klimatu a způsobu využití krajiny v minulých dobách je stěžejní pro předpověď vývoje polohy HHL. Podoba a míra lidské činnosti v minulosti má do současnosti totiž přesah v podobě druhového složení a distribuce aktuálních HHL (Holtmeier 2009). Někteří autoři dokonce staví význam vlivu lidské činnosti nad význam změny klimatu (např. Motta a kol. 2006, Casalegno a kol. 2010, Ameztegui a kol. 2010). Dirnböck a kol. (2003) uvádí, že poloha ekotonu HHL např. v evropských Alpách je velmi silně determinována mírou zemědělského využití krajiny. Tato skutečnost v těchto oblastech odráží prakticky chybějící ekotony HHL, které by nebyly narušeny lidskou činností. Příkladem uvádí Gehrig-Fasel a kol. (2007) Švýcarské Alpy. Pokud se zde nenarušené oblasti HHL vyskytují, pak většinou na prudkých, konvexních a kamenitých svazích, tedy na místech, která nebyla vhodná k zemědělskému využití. Tvar reliéfu a geomorfologie oblasti jsou obecně důležitými faktory určujícími míru a způsob využití krajiny (Plesník 1978, Boltziar 2007). Důkazem toho jsou například v Karpatské oblasti dle Plesníka (1978) Vysoké Tatry a masivy Velká a Malá Fatra. V prvním ze jmenovaných regionů antropogenní činnost existovala v poměrně omezené míře, zatímco ve druhém případě byla značně rozsáhlá a její dopad na polohu HHL byl dramatický (Czajka a kol. 2015a, 2015b). Holtmeier a Broll (2009) však upozorňují, že lidé a s nimi i změny využití krajiny působili na Zemi odpradávná. Tam, kde svahy nedosahovaly příliš velkého sklonu, který by bránil v jejich přeměně na zemědělské plochy, jsou podle autorů ekotony HHL posunuty do nižších poloh, někde až mnohonásobně.

Obecně se má za to, že lidská činnost v horských oblastech vedla v minulosti ke snížení přirozené HHL (Holtmeier 2009). Mnoho oblastí bylo odlesňováno pro potřeby zemědělství. Odlesňování obecně vede k většímu povrchovému odtoku čili snižuje schopnost retence vody v krajině, intenzifikaci erozních procesů, nárůstu lavinové aktivity apod. (Plesník 1978). García-Ruiz a kol. (2016) ve své studii poukazují na hydrologické a geomorfologické změny nastalé právě kvůli odlesnění, čímž ještě více zdůrazňují křehkost subalpínského pásu. Nahrazení lesních ploch rozsáhlými pastvinami v Iberském pohoří bylo podle nich vykoupeno vysokou cenou – oblast se v současnosti potýká s četnými sesuvy půdy při vydatných srážkách a tání sněhu. Podobně jako v Pyrenejích a Alpách, i zde bývaly hluboké půdy, povrch odlesněných oblastí je však nyní silně erodovaný (García-Ruiz a kol. 2016). Vedle relativně vysokého pohoří Alp a Karpat se lze v Evropě setkat jen s několika málo pohořími středních výšek, v jejichž rámci se HHL vyskytuje. Většina z těchto HHL je podle Hertela a Schölinga (2011) právě antropogenního původu. Kulakowski a kol. (2016) s odkazem na své dřívější studie uvádí příklad pozitivního působení člověka na polohu HHL. Například protilavinová opatření mohou pro růst stromů vytvářet



vhodnější životní podmínky, což v některých oblastech může podporovat postup lokálních HHL do vyšších poloh.

Během 20. století se od zemědělství v horských oblastech začalo pomalu upouštět. Zejména ve druhé polovině minulého století byl v důsledku toho zaznamenán postup HHL do vyšších nadmořských výšek (Theurillat a Guisan 2001, Holtmeier a Broll 2005, Weisberg a kol. 2013, Kašpar a Tremel 2016). V karpatském regionu byla situace výsledkem působení politických a institucionálních vlivů. V ukrajinských Karpatech rozloha zemědělských ploch v období socialismu pozvolna klesala, po zániku Sovětského svazu nastal úbytek ještě výraznější (Munteanu a kol. 2014). V alpském regionu dávají Motta a kol. (2006) a Casalegno a kol. (2010) změny landuse taktéž do spojitosti s událostmi od 2. poloviny 19. století. V Alpách tehdy začalo docházet k emigraci obyvatelstva z místních údolí a zároveň k rozvoji turismu na úkor zemědělství. Podobná situace nastala i v Pyrenejích. Změny ve způsobu využití krajiny spojené taktéž s depopulací horských oblastí vedly v oblasti podle Ameztegui a kol. (2010) k výraznému rozšíření porostů borovice pyrenejské (*Pinus uncinata*). Pokles intenzity využívání pastvin v horských polohách v kombinaci s postupným oteplováním klimatu vytvořil ideální podmínky pro vzestup tehdejší hranice lesa (Motta a kol. 2006). Dopady klimatických změn a společenských proměn totiž začaly působit zhruba ve stejnou dobu (Mihai a kol. 2007, Weisberg a kol. 2013). Kromě omezení zemědělství v horských oblastech, z něž nejvýznamnější roli hrála vždy pastva dobytka (Weisberg a kol. 2013), a změn klimatu má svůj podíl na postupné obnově lesa i zřizování chráněných oblastí, např. v Západních Karpatech na Slovensku a v Polsku a v Ukrajinských Karpatech (Kozak 2003, Boltižiar 2007, Sitko a Troll 2008). Po omezení zemědělství v horských oblastech poloha HHL v kombinaci s příznivějšími klimatickými podmínkami (teplejším podnebím) postupovala poměrně rychle – v některých oblastech tento posun činil až 9 m za desetiletí (Weisberg a kol. 2013). V některých evropských pohořích však pokles míry využití krajiny člověkem není tak silně spjat s postupem HHL do vyšších poloh. Ameztegui a kol. (2016) dokazují na výsledcích studie provedené v Pyrenejích, že zřetelná změna ve využití krajiny v tomto regionu nevedla k tak výraznému posunu HHL jako jinde, např. jako právě v Karpatech. Pokles zemědělských aktivit v horských oblastech Pyrenejí se v ekotonech HHL projevil spíše rostoucí hustotou zápoje než nárůstem nadmořské výšky stanovišť stromů. Současná poloha HHL je podle nich nejvíce ovlivněna využitím krajiny v minulosti, neboť podle autorů nebyl v této oblasti zaznamenán výrazný vliv změny klimatu. Podobně i Tremel a kol. (2016) na příkladu sudetských pohoří ve Střední Evropě demonstrují, že postup HHL do vyšších poloh byl indukován spíše opuštěním zemědělských ploch v těchto oblastech než změnami

klimatu. Autoři vyjadřují předpoklad přetrvávajícího postupu HHL v důsledku změn ve využití krajiny člověkem v minulosti. Nicméně ale předesílají zpomalený postup HHL do vyšších poloh ve srovnání s minulým stoletím. Důvodem je podle nich to, že efekt relativně náhlého upuštění od zemědělství v regionu zkrátka dlouhodobě nepřetrvává.

Z hlediska historických událostí 20. století lze nárůst zalesnění a posun polohy HHL do vyšších nadmořských výšek připisovat i demografickým trendům. Významnou roli ve vývoji lesů ve Střední a Východní Evropě sehrála zejména 2. světová válka, jež měla za následek redukci populace nebo poválečný úbytek obyvatelstva ve venkovských oblastech. Například v Alpách na území Švýcarska je podle Gehrig-Fasel a kol. (2007) hlavním důvodem pro postup HHL do vyšších nadmořských výšek především odliv obyvatelstva z horských oblastí. Vedle poválečného zvyšování míry urbanizace se společnost začala postupně orientovat na práci v sektorech průmyslu a služeb (Kozak a kol. 2007), což mělo ve venkovských a horských oblastech příznivý vliv na lesní porosty. V západní části karpatského oblouku bylo různými vládními nařízeními pastevectví omezováno od 2. světové války (Plesník 1978), mezi důvody těchto opatření patřila např. ochrana vodních zdrojů, snížení míry eroze půdy nebo rozvoj turismu. V celém pohoří Karpat změny probíhaly víceméně srovnatelně, jedinou oblastí s mírně odlišným průběhem je Ukrajina, kde HHL vykazují větší stabilitu (Weisberg a kol. 2013). Ta je podle autora ovlivněna tím, že 2. světová válka neměla v ukrajinské části Karpat tak výrazné dopady jako např. v Západních Karpatech nebo Rumunsku. S odkazem na Sitko a Troll (2008) však uvádí i vliv stále přetrvávajícího sezónního (letního) pastevectví v oblasti ukrajinských *polonin*. Podle těchto autorů jsou změny polohy HHL právě v blízkosti farem mnohem menší než jinde. Shandra a kol. (2013) předkládá, že v dané oblasti může roli hrát i větší podíl listnatých lesů a s tím související pomalejší průběh změn HHL.

Závěrem je důležité uvést, že způsob využití krajiny má dopad zejména na podobu zapojeného lesa a průměrné nadmořské výšky HHL, zatímco nejvyšší polohy HHL jsou ve většině případů určovány přírodními podmínkami (Körner 2012).

#### **4.3 Vlivy na průběh horní hranice lesa v Karpatech**

Poloha HHL je i v Karpatech utvářena působením přírodních podmínek a vlivu lidské činnosti. Z pohledu přírodních charakteristik oblasti je pro tento region důležitý vliv hmotnatosti pohoří (MEE) [Czajka a kol. 2015b]. Na celkový ráz krajiny ve vysoko položených oblastech Karpat měla dlouhodobě velký vliv antropogenní činnost (Czajka a kol. 2015a), která se významnou měrou podílela na utváření podmínek ovlivňujících vznik a polohu HHL (Sitko a Troll 2008).

Značnou nevýhodou v objasňování situace ohledně polohy HHL v Karpatech je v porovnání s ostatními evropskými pohořími však relativní nedostatek zdrojů mapujících využití krajiny v minulosti (Feurdean a kol. 2015). Z lidských aktivit byla nejvýznamnější zcela jistě pastva dobytka (Weisberg a kol. 2013), důležitou roli však měla i těžba dřeva nebo získávání dřevěného uhlí (Plesník 1978). Krajina byla v minulosti utvářena nejen přímým působením člověka na konkrétních místech, ale podstatnou roli zde sehrávala i politická situace a socioekonomické uspořádání oblasti, tedy faktory větších měřítek (Sitko a Troll 2008, Munteanu a kol. 2014, Czajka a kol. 2015a).

Ve vyšších polohách Západních Karpat začal člověk výrazně ovlivňovat krajinu v době kolem 15.–16. století, ačkoliv zde prostřednictvím pastevectví působil již o 200 let dříve (Plesník 1978). Tato doba je spojena s Valašskou kolonizací. Mýcení lesních porostů pro potřebu rozlehlých pastvin neprobíhalo jen v oblastech HHL (tj. seshora dolů), ale postupovalo i z nižších poloh do vyšších (Plesník 1978). Lesní plochy tak byly likvidovány ze dvou směrů. V regionu ukrajinských Karpat byla situace srovnatelná, i tam je většina HHL antropogenního původu (Sitko a Troll 2008). Autoři také vysvětlují důvod vzniku bezlesí ve vysoko položených oblastech Černoohorského regionu. Lesní porosty zde byly mýceny z důvodu rozvoje zemědělství orientovaného na chov hospodářských zvířat. Během několika staletí vedlo letní hospodaření v horských oblastech ke vzniku rozsáhlých pastvin zvaných *poloniny*. Jen jejich naprosté minimum náleží podle autorů do přirozeného vegetačního pásma alpských luk, většina vznikla právě vymýcením subalpínských křovin a lesů.

Minulé století bylo ve znamení společenské změny. Na celém území Karpat byl v průběhu 20. století podobně jako ve zbytku Evropy zaznamenán pokles podílu zemědělských ploch (Sitko a Troll 2008, Munteanu a kol. 2014). S klesajícími výnosy zemědělské produkce, příchodem alternativních způsobů příjmů a rostoucím uvědoměním potřeby ochrany přírody začala intenzita využití krajiny člověkem ve prospěch horských lesů slábnout (Sitko a Troll 2008). Se současnými projevy oteplování klimatu to na mnoha místech vedlo k postupnému zvyšování nejvyšších poloh HHL. Autoři zároveň poukazují na poněkud opožděný vývoj situace v ukrajinských Karpatech. Ten byl podle nich způsoben především politikou Sovětského svazu, pod jehož nadvládou byly horské pastviny v této oblasti (*poloniny*) i nadále využívány zemědělskými podniky (tzv. *kolchozy*). Vedle toho kvůli politice SSSR v regionu chyběly alternativní zdroje obživy např. z turismu. Výsledkem těchto skutečností mimo jiné bylo i zpomalení regenerace lesních porostů (Sitko a Troll 2008). Nejvyšší míra opouštění pasteveckých a zemědělských oblastí v horách pak nastala v 90. letech po zániku Sovětského svazu (Sitko a

Troll 2008, Munteanu a kol. 2014). Nejen v důsledku historických událostí v regionu bylo mezi lety 1930 a 2000 vyzorováno zmenšování ploch nad HHL (Martazinova a kol. 2011). To indikuje postup HHL nejen v reakci na omezení lidských aktivit v této oblasti v průběhu 20. století, ale i na změnu atmosférické cirkulace (Martazinova a kol. 2011). Ta podle autorů měla za následek postupný nárůst teplot jak v zimním, tak v letním období. Autoři na své studii dokazují i odlišnou reakci jehličnatých a listnatých HHL. Zatímco u hranic tvořených jehličnatými druhy byl zaznamenán poměrně výrazný postup do vyšších nadmořských výšek (někde až o 80 metrů, Sitko a Troll 2008), změna u listnatých lesů byla pozorována velice malá nebo žádná.

## 5 Teplotní databáze použitelné pro stanovení teplot na horní hranici lesa

Existuje několik volně dostupných teplotních databází. Mezi sebou se liší rozlišením, počtem sledovaných údajů, velikostí území, ke kterému se vztahují, nebo třeba časovým rozmezím, za něž jsou data sledována. Nejdůležitějšími databázemi pro tuto práci byly zejména dvě – WorldClim a CRU TS dataset.

O první ze jmenovaných použitých databází, **WorldClim**, pojednává Hijmans a kol. (2005). Databáze WorldClim vznikla interpolací měsíčních průměrů klimatických proměnných z meteorologických stanic. Zdrojem dat byl například Global Historical Climate Network Dataset (GHCN), WMO Climatological Normals (CLINO) nebo FAOCLIM 2.0, přičemž poskytnutá data pocházela většinou z období let 1950–2000. Databáze WorldClim obsahuje data pouze z povrchu pevniny, zcela chybí území Antarktidy. Po získání dat z meteorologických stanic vznikla pomocí platformy ANUSPLIN prostorově interpolovaná data v pravidelném gridovém uspořádání v nejvyšším rozlišení 30 arc s. Toto rozlišení poskytuje gridové buňce 0,86 km<sup>2</sup> v oblasti rovníku, proto se někdy nazývá rozlišením „kilometrovým“ (Hijmans a kol. 2005). Podle autorů nemusí být při nižších rozlišeních (tj. menším než 1 km<sup>2</sup>) dobře patrná variabilita prostředí. S takovým rizikem jsou spjatý zejména horské oblasti. Díky vysokému rozlišení však může databáze WorldClim nabídnout až čtyřsetkrát větší prostorové měřítko než předchozí dostupné verze. Vysoké rozlišení je podle Hijmanse a kol. (2005) základním předpokladem pro dobrý výzkum horských oblastí a dalších regionů s výrazným klimatickým gradientem. Zároveň však upozorňuje, že existence vysokého rozlišení neznamena automaticky vyšší kvalitu dat ve všech oblastech. Mezi negativa databáze WorldClim řadí autoři především možný výskyt nepřesností zapříčiněný nízkou hustotou meteorologických stanic a ignorování aspektů důležitých v lokálním měřítku. Polem s největšími nedostatky jsou podle nich data o úhrnech srážek v hornatých oblastech.

Za vznikem datasetu **CRU** (Climate Research Unit) stála myšlenka vedoucí ke tvorbě globálního datasetu pro pevninu s běžně užívanými klimatickými charakteristikami (Harris a kol. 2014). Zjištěné staniční odchylky byly interpolovány a zkombinovány s již existujícími klimatickými údaji. Tato analýza měsíčních dat naměřených více než 4 000 meteorologickými stanicemi poskytla podklady pro vznik gridové databáze s rozlišením 0,5°. Dataset CRU obsahuje 6 většinou nezávislých klimatických proměnných (průměrná teplota vzduchu, denní amplituda teplot, srážkové úhrny, počet dní se srážkami, tlak páry a oblačnost). Dvě doplňkové (dny

s teplotou pod 0 °C a potenciální evapotranspirace) byly dopočítány z dostupných dat. Dataset CRU je dostupný na webových stránkách CRU (<http://www.cru.uea.ac.uk/>) ve formátu ASCII i NetCDF v několika verzích. Všechny verze poskytují datovou řadu od roku 1901. Od sebe se pak liší délkou této datové řady. Nejnovější verzí databáze je CRU TS 4.00, jež obsahuje data od roku 1901 do roku 2015. Harris a kol. (2014) uvádějí, že všechny verze jsou v podstatě aktualizacemi těch předchozích. Všechny se podle autorů liší nejen obdobím, za které jsou data poskytována, ale i databázemi, z nichž data pocházejí.

Vedle databází pokrývajících v podstatě celý svět existuje samozřejmě i řada databází shromažďujících a vyhodnocujících naměřená data ve větším měřítku. Jako příklad lze zmínit, zejména z důvodu pokrytí značné části území Karpat, dataset **ROCADA** (Romanian Climatic Dataset). Podle autorů Dumitresca a Birsana (2015) je práce s kvalitními klimatickými daty základním předpokladem pro realistické hodnocení klimatických změn a proměnlivosti regionu. Dataset ROCADA vznikl spoluprací devíti států (Česko, Slovensko, Polsko, Rakousko, Maďarsko, Rumunsko, Ukrajina, Srbsko a Chorvatsko) v rámci projektu CARPATCLIM financovaného Evropskou Unií. Interpolací dostupných denních dat z meteorologických stanic zúčastněných států vznikla gridová databáze s prostorovým rozlišením 0,1°. Data pokrývají období let 1961–2013, obsahují 9 klimatických proměnných (průměrná teplota vzduchu, nejnižší a nejvyšší teploty vzduchu, tlak vzduchu, teplota půdy, srážkové úhrny, počet slunečných dnů, oblačnost a relativní vlhkost), a jsou dostupná ve formátu NetCDF. Získaná data prošla kvalitou kontroly, homogenizací a prostorovou interpolací. Dataset podle autorů dobře zachycuje orografii a je vhodný pro výzkum proměnlivosti podnebí. Jeho nevýhodou je, stejně jako u každé gridové databáze, průměrování hodnot na celou buňku gridu. Do budoucna autoři počítají s rozšířením o více proměnných (např. hloubka sněhu a rychlost větru), pokrytím delšího časového období, s použitím nových interpolačních metod a se zlepšením prostorového rozlišení především kvůli lepší interpretaci srážkových úhrnů.

## 6 Fyzickogeografická charakteristika Karpat

Karpatský oblouk se od sousedního alpského oblouku značně liší, ačkoli oba byly vyvrásněny během alpínské orogeneze (Votýpka 1994). Odchyly oproti Alpám se projevují nejen ve vlastnostech reliéfu a geologické stavby, ale i ve srážkových úhrnech a tím pádem i v charakteru vegetačního pokryvu (Netopil a kol. 1989). V úvodu této části je nutno poukázat i na nejednotný přístup k členění karpatského oblouku, přičemž největší potíže činí členění Karpat paradoxně ve státech, jimiž tato horská soustava prochází (Votýpka 1994). Tuto skutečnost předesílá i několik dalších autorů (Netopil a kol. 1989, Král 1999, Šlégl 2005). Ve svých publikacích však Karpaty většinou člení jednoduše a přehledně na základě českého dělení na Západní Karpaty, Východní Karpaty a Jižní Karpaty s Apusenskou větví (Votýpka 1994). Poloha karpatského celku v rámci Evropy je patrná z Obrázku 5.



*Obrázek 5: poloha horského celku Karpat v rámci Střední Evropy*

### 6.1 Geologie

Soustava byla vrásněna ve dvou fázích. Počátky vzniku pohoří jsou datovány do období křídy, druhá fáze vrásnění spadá do oligocénu (Votýpka 1994). Pohoří Karpat je typickým pásebným pohořím se složitou stavbou (Votýpka 1994, Král 1999, Šlégl 2005), kdy velká část je budována příkrovy (Král 1999). Karpaty jsou obloukovitě prohnutým pásmem s vrásnozlomovou

strukturou (Netopil a kol. 1989). Od ostatních horských systémů vyvrásněných během alpinského vrásnění Karpaty odlišuje výrazný vnitřní vulkanický pás (Votýpka 1994).

Šířka pohoří v celé jeho délce značně kolísá – nejširší je pohoří ve své západní části, nejužší potom dále na východ (Votýpka 1994). Z geologického hlediska lze karpatský oblouk rozdělit do tří základních pásem (Král 1999). Jedná se o pásmo vnější (flyšové), jež je tvořeno pískovci, slepenci a jílovci, pásmo centrální, které tvoří metamorfované horniny, hlubinné vyvřeliny a druhohorní sedimenty, a třetí, pásmo vnitřní, které je tvořeno neogenními vulkanity (Král 1999). V Západních Karpatech je mezi vnější a centrální pásmo vklíněno ještě pásmo bradlové s vápencovými horninami (Král 1999). Východní Karpaty jsou tvořeny především vnějším flyšovým pásmem, zatímco centrální je redukováno pouze na několik masívů v rumunsko-ukrajinském pohraničí (Král 1999). Kromě těchto vlastností je třeba zmínit i významné zastoupení vulkanického pásma, které pak v Jižních Karpatech úplně chybí (Král 1999). Jižní část celku postrádá kromě vulkanického pásma i pásmo vnější (flyšové), je tedy tvořena především hlubinnými vyvřelinami, metamorfovanými horninami a místy karbonátovými sedimenty (Král 1999). Oblast Jižních Karpat je i v dnešní době tektonicky aktivní, příkladem může být zemětřesení o síle magnitudo M 7,2 z roku 1977 (Král 1999).

## 6.2 Reliéf

Horský systém Karpat je vesměs středohorského rázu, pouze v nejvyšších polohách se vyskytuje krajina rázu velehorského (Král 1999). V karpatském oblouku je významná, podobně jako v pohoří Alp, modelace povrchu činností řek a svahové pohyby (Votýpka 1994, Král 1999). Druhý činitel ze jmenovaných se projevuje zejména ve vnějším flyšovém pásmu, a hraje v oblasti významnou roli ve vývoji svahů (Král 1999). Pozůstatky zarovnaných povrchů v různých nadmořských výškách jsou důkazem období tektonického klidu (Král 1999). Nejvíce zastoupeným typem údolní sítě jsou údolí konsekventní, ale nechybí zde výskyt ani subsekventních údolí, jež jsou často až soutěskovitého charakteru (např. soutěska Černé věže, Železná vrata) [Král 1999].

Zalednění v oblasti bylo na rozdíl od Alp pouze ostrovního charakteru, erozní glaciální reliéf se vyskytuje v nejvyšších polohách centrálního pásma, ve výškách nad 1 900 m n. m. (Votýpka 1994, Král 1999). Plesník (1971) uvádí, že v karpatské oblasti jsou projevy ledovcové činnosti výrazné, Šlégl (2005) jim přisuzuje dokonce zásadní vliv. Ostatní autoři (Král 1999, Votýpka 1994) však glaciální modelaci terénu takovou váhu nepřipisují. Projevy působení ledovců jsou patrné ve formě hornů, trogových údolí, karů, morén, ale i četných jezer (Plesník



1971, Votýpka 1994, Král 1999). Krajinu modelovanou zmíněnými ledovcovými útvary lze pozorovat zejména v Nízkých i Vysokých Tatrách (Konček a kol. 1974), ale v několika rumunských pohořích např. Retezat, Făgăraș, Rodna (Král 1999). Ačkoliv je území karpatského oblouku bez zalednění, i tak je na mnoha místech možné pozorovat činnost a vlivy mrazového zvětrávání (Král 1999, Šlégl 2005).

Nezanedbatelným činitelem v utváření podoby Karpat je i vulkanická činnost. Ta se projevuje přirozeně ve vulkanickém pásmu, kde lze nalézt strukturní tvary reliéfu v západní a východní části Karpat, například vypreparované výplně sopouchů (Král 1999). Posledním výrazněji působícím faktorem tvořícím povrch oblasti je krasování, jež probíhá na vápencích a dolomitech v krasových oblastech plošinného rázu. Příkladem nechtě je Slovenský kras nebo oblasti na území Rumunska (Král 1999).

### 6.3 Klima

Oblast karpatského oblouku spadá do mírného kontinentálního podnebí s mírným severoatlantickým vlivem (Dragotă a Kucsicsa 2011), přičemž charakter klimatu je zde určován především nadmořskou výškou (Votýpka 1994). Klima Karpat je, opět ve srovnání s Alpami, kontinentálnějšího rázu, což v tomto případě znamená především nižší úhrny srážek a větší amplitudy teplot (Král 1999). Kontinentalita klimatu se zvyšuje od západu k východu (Czajka a kol. 2015b).

Teplotní poměry jsou v oblasti Karpat určovány zejména nadmořskou výškou. Teplotních maxim je v rámci karpatského oblouku dosahováno v červenci, minimální teploty se projevují v měsíci lednu (Doležal a Šrůtek 2002, Kern a Popa 2008, Dragotă a Kucsicsa 2011). S výrazným nárůstem nadmořské výšky se však nejvyšší teplotní průměry přesouvají z července na srpen, nejnižší pak z měsíce ledna na únor (Konček a Orlicz 1974).

Červencové teplotní průměry se ve výše položených oblastech pohybují v rozmezí 5–7 °C (Král 1999), což dokazují i výsledky studie Doležala a Šrůtky (2002) zahrnující data ze stanice Chopok (2 004 m n. m.). Ty vykazují červencový teplotní průměr 6,1 °C. Níže položené oblasti kolem 1 800 m n. m. dosahují hodnot blízkých 10 °C (stanice Lacauti; Bouriaud a Popa 2009), průměrné červencové teploty vzduchu míst v ještě nižších nadmořských výškách, kolem 1 200 m n. m., se pohybují kolem 12 °C (stanice Srdiečko; Doležal a Šrůtek 2002). V nížinách se teplotní průměry nejteplejšího měsíce pohybují mezi 20 a 23 °C (Král 1999). Nejchladnějším měsícem bývá leden. Průměrné teploty v tomto měsíci jsou opět odvíjeny od polohy konkrétního místa.

Data naměřená meteorologickými stanicemi ve Vysokých a Nízkých Tatrách potvrzují obecný předpoklad poklesu zimních teplot s rostoucí nadmořskou výškou (Ostrožlík 2010). Průměrné zimní teploty v polohách nad 2 500 m n. m. padají např. na Lomnickém štítě na  $-10,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , meteorologická stanice na Chopku ve výšce 2 004 m n. m. pak zaznamenává průměrné zimní teploty kolem hodnoty  $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Ostrožlík 2010). Na níže položených místech v karpatském regionu (např. stanice Baisoara v Apusenské větvi Karpat, 1 384 m n. m.) se teplotní průměry v zimním období pohybují kolem  $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (staniční data). Nejnížší roční teplotní průměry jsou nejtypičtější pro vysoko položené oblasti rumunských Karpat, např. v pohoří Rodna padají na  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Dragotă a Kucsicsa 2011), v některých vrcholových oblastech Jižních Karpat až na hodnoty kolem  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (pohoří Bucegi, z dostupných klimatických dat), v nižších nadmořských výškách se mohou pohybovat v mezích hodnot blízkých hranici  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (data dostupná pro stanici Baisoara, 1 384 m n. m.). V zimních měsících jsou v mezihorských kotlinách časté teplotní inverze (Netopil a kol. 1989, Votýpka 1994), při nichž klesá teplota v těchto místech až na  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Netopil a kol. 1989).

Kromě snižujících se teplot s rostoucí nadmořskou výškou je ve vyšších polohách charakteristickým znakem i zmenšování teplotních amplitud mezi zimním a letním obdobím. Roční amplitudy teplot v relativně nízko položených oblastech se pohybují (na základě dat kolem poloviny minulého století) kolem  $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na hřebenech hor a horských štítech je to pak sotva kolem  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Konček a Orlicz 1974). Tomuto tvrzení pro vyšší polohy Karpat odpovídají amplitudy teplot zjištěné ze zpracovávaných staničních dat (Tabulka 1). Roční amplitudy pohybují od  $22,9$  do  $15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ačkoliv se v prezentované řadě vyskytují výkyvy odvislé od geografické polohy nebo lokálních charakteristik konkrétní oblasti, je z hodnot zjištěných amplitud obecně poměrně dobře patrný jejich pokles s rostoucí nadmořskou výškou. Za nejchladnější a nejteplejší měsíce jsou víceméně automaticky považovány leden a červenec, je však důležité si uvědomit, že toto pravidlo nemusí platit právě pro vysoké horské polohy. S rostoucími nadmořskými výškami se nejchladnější a nejteplejší období přesouvají na měsíc únor a srpen, v nejvyšších polohách je právě srpen nejteplejším měsícem v roce. Díky tomuto je poměrně zřejmé, že pro vyšší polohy je charakteristické relativně chladné jaro a teplejší podzim (Konček a Orlicz 1974).

*Tabulka 1: roční amplitudy teplot v různých nadmořských výškách vypočtené na základě dat z období 1961–1990.*

název stanice	nadmořská výška [m n. m.]	roční amplituda teplot [°C]
<b>Cluj-Napoca</b>	413	22,9
<b>Baisoara</b>	1 384	17,7
<b>Pogegevskaia</b>	1 429	18,7
<b>Paltinis</b>	1 454	17,3
<b>Rarau</b>	1 574	18,8
<b>Ceahlau Toaca</b>	1 897	17,8
<b>Varful Omu</b>	2 504	15,9

V karpatském regionu poukazují Weisberg a kol. (2013) na trend oteplování klimatu, jenž je podle nich patrný od 70. let minulého století. Ve své studii růst teplot dokazují na základě výsledků analýz dostupných dat 10 rumunských meteorologických stanic i Piticar a Ristoiu (2012). Jedná se podle nich o důkaz obecného oteplování klimatu nejen v karpatském regionu a Evropě, ale na celém světě. S odkazem na jiné autory uvádějí rok 1988 jako zlomovým rokem pro většinu stanic v Evropě, kdy došlo k výrazné teplotní změně. Stojí za tím mj. i posun polohy Severoatlantické oscilace (NAO) do nynější rozšířené fáze (Piticar a Ristoiu 2012). Autory bylo dále zjištěno, že klimatické změny se konkrétně v této oblasti projevují nárůstem teplot v letním období (červen, červenec, srpen), ačkoliv Martazinova a kol. (2011) ve své studii z Ukrajinských Karpat hovoří o nárůstu teplot i v období zimním. S měnící se teplotou v závislosti nejen na klimatických změnách, ale i na nadmořské výšce, se proměňuje i délka trvání vegetačního období. Doležal a Šrůtek (2002) z dostupných dat zjistili, že délka vegetačního období klesá s rostoucí nadmořskou výškou velmi rychle. V místě nejnižše položené stanice (Srdiečko, 1 183 m n. m.), již do svého výzkumu zahrnuli, stanovili délku vegetačního období na 151 dnů. Oproti tomu v nejvyšších polohách (Chopok, 2 023 m n. m.) studované oblasti byla doba trvání vegetačního období vlivem nižších teplot zkrácena o téměř dvě třetiny na 62 dnů.

Ve srážkových úhrnech je evidentní trend v jejich přibývání s rostoucí nadmořskou výškou a ubývání v západovýchodním směru (Král 1999). V Západních Karpatech srážkové úhrny dosahují 1 200 až 1 700 mm/rok, kdežto ve Východních a Jižních pouze od 1 000 do 1 200 mm/rok (Král 1999). V nejvyšších polohách roční úhrny přesahují i 2 000 mm (např. v Tatrách 2 100 mm/rok) [Netopil a kol. 1989, Král 1999]. Vyšším srážkovým úhrnům brání bariéra tvořená pohořím Alp, Dinárských hor a Českého masivu a poměrně velká vzdálenost od moře (Czajka a kol. 2015b). Na většinu území Karpat připadá ohledně srážkových úhrnů jedno maximum ročně (červen), v nížinách karpatské oblasti se však už projevuje mediteránní vliv, jenž má za následek

maxima dvě (v květnu a říjnu) [Král 1999]. Doležal a Šrůtek (2002) ve své studii zjistili, že se úhrny srážek mezi třemi zkoumanými místy (1 183 m n. m., 1 515 m n. m. a 2 023 m n. m.) liší relativně málo. Nicméně na tyto výsledky je důležité pohlížet s jistou rezervou, neboť nelze určit, zda se nejedná o lokálně specifický jev. Autoři dále poukazují na to, že v době srážkových maxim je vyšších úhrnů dosahováno v níže položených polohách.

Poloha dnešní sněžné čáry leží těsně nad nejvyššími vrcholy, což má v některých těchto oblastech za následek sněhovou pokrývku trvající až 10 měsíců. V nejvyšších, závětrných a stíněných polohách se mohou vyskytovat permanentní sněhová pole (Votýpka 1994).

## 6.4 Půdy

Půdy se, jakožto neustále měnící se přírodní útvar, vyvíjejí na základě působení půdotvorných činitelů (Tomášek 2014). Mezi tyto činitele se řadí např. charakteristika substrátu (matečné horniny) nebo biologické faktory, jenž zahrnují vliv vegetačního pokryvu, ale i činnost edafonu (Tomášek 2014). Na území Karpat tomu není jinak. V takových horských oblastech však významnou roli hraje ještě nadmořská výška nebo sklon svahu, který společně se substrátem určuje kvalitu a typ půd (Král 1999, Czajka a kol. 2015a).

V níže položených oblastech karpatského oblouku lze v oblastech původně listnatých lesů nalézt kambizemě (Netopil a kol. 1989). Ty s rostoucí nadmořskou výškou přecházejí vlivem degradace a procesu podzolizace v druhotně vysazených smrkových lesích k půdám podzolovým (Netopil a kol. 1989, Král 1999). Ve flyšovém pásmu a v nejvyšších pohořích v centrálního pásma Karpat se lze setkat s nenasycenými kambizeměmi (Král 1999). Ve vápencových oblastech na substrátech tvořených karbonátovými sedimenty jsou zformovány rendziny (Konček a kol. 1974, Netopil a kol. 1989). V oblasti vulkanického pásma se na neovulkanických substrátech vytvořily nasycené a rubefikované kambisol (Král 1999). V alpském kosodřevinovém stupni se vyskytují půdy s nahromaděným humusovým horizontem, jelikož nižší teploty znesnadňují průběh humifikačních procesů (Konček a kol. 1974). Půda v těchto oblastech nevytváří pevnou strukturu, což po jejím vysušení a následném přemokření může mít za následek vznik půdotoků, jež jsou podle Končeka a kol. (1974) charakteristické nejen pro chladné podnebí vysokých nadmořských výšek, ale i pro polární oblasti.

## 6.5 Vodstvo

Horský systém Karpat se leží na hranici dvou významných evropských úmoří. Ze severně orientovaných svahů jsou vody karpatských řek odváděny do Odry a Visly, a jimi pak dále do Baltského moře (Šlégl 2005). Z ostatních částí horského celku Karpat končí vody řek společně s nejvýznamnějším tokem této oblasti (Dunajem) v Černém moři (Šlégl 2005).

Karpatská oblast v porovnání se sesterským pohořím Alp nedisponuje takovým množstvím zdrojů vodnosti svých vodních toků (Král 1999). Netopil a kol. (1989) poukazuje na hustou síť horských bystřin, pro něž jsou zdroji vodnosti dešťové srážky a tající sněh. Nejvyšší hodnoty průtoků vodních toků připadají na jarní období, kdy vodní toky dosahují 40–45 % svého ročního odtoku, nejnižší jsou hladiny řek na podzim v říjnu (Netopil a kol. 1989). Ze zmíněných hodnot je zřejmé, že odtoky řek jsou v rámci roku značně nevyrovnané. Na flyšových horninách nejsou výjimečné prudké povodně z vydatných dešťů (Netopil a kol. 1989).

Karpaty jsou pohořím poměrně bohatým na jezera. Jejich existence je úzce spjata s výskytem ledovců v minulosti. Oblastí s nejvyšším počtem jezer jsou Vysoké Tatry (Konček a kol. 1974), podle Šlégl (2005) jich zde můžeme nalézt kolem 120. Několik přírodních vodních ploch se však nachází i v rumunské části pohoří (Šlégl 2005). Vedle jezer nezůstává karpatská oblast pozadu ani v počtu minerálních pramenů, kterých zde vyvěrá několik desítek (Šlégl 2005). Důkazem může být existence několika lázeňských oblastí, z nichž jmenujme třeba Starý Smokovec na Slovensku (Konček a kol. 1974) nebo Herkulovy lázně v rumunských Jižních Karpatech (Šlégl 2005).

## 6.6 Vegetace

Vegetační poměry jsou v Karpatech, obdobně jako jinde na světě, vyvinuty na zejména na základě půdních a klimatických podmínek, jež se zpravidla odvíjí od nadmořské výšky. Lesy pokrývají více než polovinu horských oblastí karpatského regionu (Grodzińska a kol. 2004) a patří tak k nejzalesněnějším na evropském kontinentu (Netopil a kol. 1989). Nej hustějšími lesními porosty disponují Východní Karpaty, naopak nejméně zalesněné jsou Karpaty Západní (Grodzińska a kol. 2004). Nejvýznamnějšími druhovými zástupci stromů karpatské oblasti je smrk ztepilý (*Picea abies*), buk lesní (*Fagus sylvatica*) a jedle bělokora (*Abies alba*), vzácněji se mohou vyskytovat modřín opadavý (*Larix decidua*) nebo ve vápencových a pískovcových oblastech i borovice lesní (*Pinus sylvestris*) [Netopil a kol. 1989, Votýpka 1994, Grodzińska a kol. 2004].

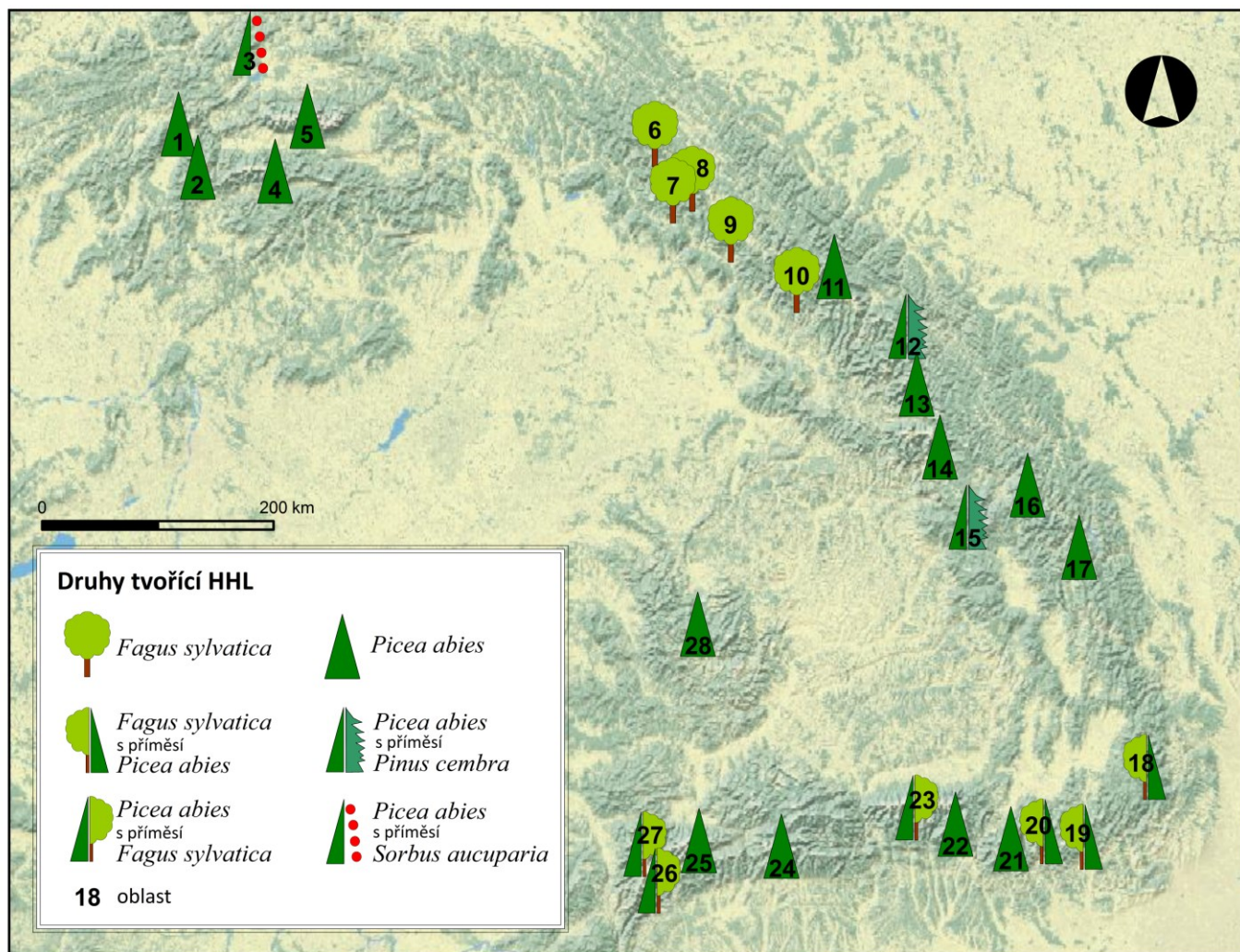
Král (1999) v rámci horské oblasti Karpat vymezuje několik vegetačních stupňů. Prvním z nich je stupeň kolinní, jenž se rozprostírá v Západních Karpatech od 400 do 600 m n. m., v Jižních pak od 600 do 700 m n. m. Na něj navazuje stupeň submontánní rozprostírající se v Západních Karpatech do 1 000 m n. m., v jižní části pohoří ho lze identifikovat až do 1 400 m n. m. Tento stupeň následně přechází v pásmo montánní, jehož horní hranice je zároveň i horní hranicí lesa. Nad HHL je přítomný úzký pás nesouvisle se vyskytující borovice kleče nebo pěnišníků, na jejichž úkor bývají zejména v Rumunsku často rozšiřovány alpské louky (Netopil a kol. 1989). Pásmo borovice kleče je v Karpatech označováno jako subalpinský stupeň rozprostírající se 200–400 m nad HHL, pouze v nejvyšších horských masivech se lze setkat ještě se stupněm alpským a subniválním (Plesník 1971, Král 1999).

V kolinním stupni ze stromů převládají *Quercus robur* a *Quercus petraea* a dále zástupci habrů, jasanů a bříz (Král 1999, Votýpka 1994). Bukové porosty jsou pak řazeny do stupně submontánního, konkrétním zástupcem zde může být *Fagus sylvatica*. Bukové lesy tvoří v některých státech, jimiž Karpaty probíhají, až třetinu všech lesních porostů (Král 1999). Do montánního stupně spadají nejvýše položené zalesněné oblasti, v nichž se lze setkat se smrkovými porosty (*Picea abies*), jejich významnou příměs tvoří i borovice limby (*Pinus cembra*), jeřáby (*Sorbus aucuparia*) a modříny (*Larix decidua*). Pro předposlední ze jmenovaných vegetačních pásem, subalpinský stupeň, je charakteristický výskyt kleče, v Jižních a Východních Karpatech je možné se setkat i se zástupci pěnišníku (*Rhododendron kotschyi*). Skladbu nejvýše položených alpských luk připadajících do alpského vegetačního stupně představuje zejména bylinná složka bez jakýchkoliv dřevin, často jsou zde významně zastoupena i mechovo-lišejníková společenstva (Král 1999).

Dominantním druhem HHL v Karpatech je smrk ztepilý (*Picea abies*), jak je patrné z Obrázku 6, nicméně zhruba ve čtvrtině masivů Západních a Východních Karpat je podle Czajky a kol. (2015b) ekoton HHL tvořen bukem lesním (*Fagus sylvatica*). Buk se na tvorbě ekotonu HHL podílí zejména v Západních Bieszczadech (Czajka a kol. 2015a). V případě opadavých hranic lesa se podle Weisberga a kol. (2013) však jedná o HHL antropogenního původu, jež vznikly vykácením výše položených jehličnatých porostů. V oblasti Čornohory se přirozené smrkové porosty vyskytují s příměsemi borovice limby (*Pinus cembra*) [Czajka a kol. 2015b]. Vedle zmíněných druhů je důležitým zástupcem ekotonu HHL i modřín opadavý (*Larix decidua*), jehož porosty se v Karpatech vyskytují až do výšky 1 900 m n. m. (Da Ronch a kol. 2016). Nad HHL se v některých oblastech rozkládají porosty borovice kleče (*Pinus mugo*), jalovce obecného (*Juniperus communis*) a olše zelené (*Alnus viridis*) [Sitko a Troll 2008, Weisberg a kol. 2013].

Seznam oblastí (Obrázek 6):

- |                  |                    |              |
|------------------|--------------------|--------------|
| 1 Malá Fatra     | 9 Polonyna         | 18 Buzuaului |
| 2 Velká Fatra    | Borzhava           | 19 Garbova   |
| 3 Babia Góra     | 10 Krasnaja        | 20 Bucegi    |
| 4 Nízké Tatry    | Polonyna           | 21 Iezer     |
| 5 Vysoké Tatry   | 11 Gorgan          | 22 Fagaraš   |
| 6 Západní        | 12 Čornohora       | 23 Parang    |
| Bieszczady       | 13 Maramureš       | 24 Retezat   |
| 7 Polonyna Rivna | 14 Rodna           | 25 Godeanu   |
| 8 Verkhovynsky   | 15 Kalimanské hory | 26 Tarcu     |
| Vododilny        | 16 Pietrosul       | 27 Bihorului |
| khrebet          | 17 Ceahlau         |              |



Obrázek 6: mapka znázorňující dominující druhy podílející se na utváření HHL ve vybraných částech Karpat (dle Czajka a kol. 2015b)

Průměrná nadmořská výška HHL v Karpatech je Czajkou a kol. (2015b) uváděna 1 750 m n. m. Vlivem rostoucí míry kontinentality stoupá, zejména v ukrajinské části pohoří, od západu k východu (Martazinova a kol. 2011). Nejvyšších průměrných poloh dosahuje ekoton HHL v masivu Cindrel, nejvyšší hodnoty vůbec pak připadají na rumunské pohoří Retezat (kolem 2 050 m n. m.). Naopak nejnižše položené HHL jsou v oblasti v Západních a Východních Karpatech (Tabulka 2).

*Tabulka 2: nejnižše položené HHL v rámci Karpat (dle Czajka a kol. 2015b)*

	poloha (severní šířka)	poloha (východní délka)	průměrná výška HHL [m n. m.]
<b>Západní Karpaty</b>	48,5° až 49°	17° až 21°	1 330
<b>Východní Karpaty</b>	46° až 49°	21° až 27°	1 380

Poloha HHL v západokarpatském regionu byla snížena antropogenní činností průměrně o 200 až 300 metrů (Plesník 1978). V některých oblastech (např. Malá Fatra, pohoří Rodna, pohoří Tarcu, Polonina Borzhava) došlo však vlivem lidského působení a přírodních procesů k poklesu HHL až na 700 m n. m. (Czajka a kol. 2015b). V současné době je díky změnám využití krajiny v těchto oblastech zřejmý postup HHL do vyšších poloh, zejména ve slovenských a polských částech karpatského pohoří (Shandra a kol. 2013). V Západních Karpatech, konkrétně na jižních svazích Vysokých Tater, je přirozená výška klimaxové HHL Plesníkem (1978) uváděna mezi 1 730 a 1 740 m n. m. Pro některé části rumunských Karpat, např. pro Kalimanské pohoří, je přirozená HHL stanovena na zhruba 1 700 m n. m. (Kern a Popa 2008). Pro Čornohorskou oblast, nejvyšší pohoří ukrajinských Karpat, Sitko a Troll (2008) na základě mnohých autorů uvádějí polohu přirozené HHL ve výškách mezi 1 650 a 1 670 m n. m. Vedle toho Martazinova a kol. (2011) kladou průměrnou nadmořskou výšku HHL za celou část ukrajinských Karpat mezi 1 200 a 1 300 m n. m. Na některých místech je podle autorů však snížena vlivem intenzivní pastvy a blízkosti osídlení na zhruba 1 100 m n. m.



## 7 Metodika

Praktická část bakalářské práce se zabývá výpočtem některých základních teplotních charakteristik z dostupných staničních dat a jejich vztažením k současné poloze HHL v oblasti Karpat. Cílem bylo vyhledat v karpatském oblouku meteorologické stanice s dostupnými daty a určit nejvyšší polohy HHL v jejich blízkosti. Ze získaných dat byly vypočítány následující teplotní charakteristiky: průměrná teplota nejteplejšího měsíce ( $T_{NEJTEP}$ ), průměrná teplota období červen až září ( $T_{ČER-ZÁŘ}$ ) a teplotní suma za souvislé období s průměrnou denní teplotou nad 0 °C ( $DDO$ ) [Kašpar a Tremel 2016].

Meteorologické stanice byly vyhledávány na serveru Královského nizozemského meteorologického institutu (KNMI). Data ze slovenské části Karpat jsou již zpracována ve studii Kašpar a Tremel (2016), praktická část této práce se proto orientuje na zbylou část Karpat v Rumunsku a na Ukrajině. Důležitým kritériem pro výběr stanic byla kromě jejich geografické polohy i nadmořská výška, jejíž nejnižší přípustná hodnota byla stanovena na 1 300 m n. m. Aby bylo možné zahrnutí výsledků z předchozí studie a současně dobré porovnání, bylo nutné pracovat s daty teplot z období let 1961 až 1990. Vyjma meteorologické stanice při vrcholu Omu v pohoří Bucegi však žádná vyhledaná stanice neposkytovala ucelenou datovou řadu, proto musela být chybějící data dopočítána regresí. K tomu posloužila databáze průměrných měsíčních teplot CRU (Climate Research Unit) TS 4.00, jež je volně přístupná ze serveru CEDA (Centre for Environmental Data Analysis). Použitá verze datasetu CRU pokrývá období mezi roky 1901 a 2015. Nejaktuálnější verze byla vybrána z důvodu získání co nejpřesnějšího výsledku regrese pro stanici Ceahlau Toaca. Tato stanice totiž poskytuje datovou řadu od roku 2009 do současnosti.

V okolí nalezených meteorologických stanic (Tabulka 3) byly pomocí softwaru Google Earth vyhledány nejvyšší polohy HHL. Pro každou oblast byla zjištěna minimálně 3 nejvýše položená stanoviště rostoucích stromů. Získané hodnoty byly následně pro každou oblast zprůměrovány. V každé takové lokalitě byla také klasifikována forma ekotonu HHL. Při rozlišování jednotlivých hranic HHL ze snímků zprostředkovaných softwarem Google Earth bylo využito studie Harsch a Bader (2011), v níž jsou všechny rozlišované formy HHL dobře popsány. Klasifikace forem ekotonu HHL byla založena na subjektivním hodnocení. Za ostré hranice byly považovány ty, jejichž horní okraj tvořil zřetelnou souvislou linii, v jejichž rámci nebyl zřetelný pokles výšky stromů s rostoucí nadmořskou výškou, a nad nimiž se již nevyskytoval žádný

zřetelný shluk stromů. Difúzními formami HHL byly pak určeny ty, u nichž bylo evidentní rozvolňování zápoje a snižující se výška porostu s rostoucí nadmořskou výškou.

*Tabulka 3: karpatské meteorologické stanice s dostupnými daty nalezené přes server KNMI*

stanice	poloha	nadmořská výška [m n. m.]	dostupná data z KNMI [roky]	masiv	nejvyšší bod [m n. m.]
Baisoara	46°32' S 23°19' V	1 384	1951–1989	Muntele Mare	1 826
Ceahlau Toaca	46°59' S 25°57' V	1 897	2006–2017	Ceahlau	1 907
Paltinis Romania	45°39' S 23°56' V	1 454	1948–1989	Cindrel	2 244
Pogegevsckaya	48°11' S 24°30' V	1 429	2000–2009	Čornohora	2 061
Rarau	47°27' S 25°34' V	1 574	1951–1989	Rarau	1 651
Varful Omu	45°27' S 25°27' V	2 504	1941–2017	Bucegi	2 505
Cluj-Napoca*	46°47' S 23°34' V	413	1881–2016	-	-

*\*data ze stanice Cluj-Napoca byla ve dvojici se staničními daty stanice Baisoara použita pouze k výpočtu vertikálních teplotních gradientů pro oblast pohoří Bihor (Apusenská větev Karpat)*

Zjištěné teplotní průměry pro každou stanici musely být následně s užitím hodnot teplotních gradientů (Tabulka 4) přepočítány na nadmořskou výšku HHL, při čemž byl využit následující vztah:

$$T_{HHL} = T_S + \frac{(h_S - h_{HHL}) * t_G}{100},$$

kde  $T_{HHL}$  je měsíční průměr teploty naměřený meteorologickou stanicí převedený na výšku HHL,  $T_S$  představuje hodnotu teploty naměřené meteorologickou stanicí,  $h_S$  je výškou meteorologické stanice,  $h_{HHL}$  zjištěnou výškou HHL, a  $t_G$  označuje hodnotu teplotního gradientu. Z takto přepočítaných hodnot měsíčních průměrů mohly být dále počítány potřebné teplotní charakteristiky pro samotné HHL.

Tabulka 4: hodnoty sezónních vertikálních teplotních gradientů stanovené pro jednotlivé části Karpat [ $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ], dle Micu a kol. (2015)

	Západní Karpaty	Východní Karpaty	Jižní Karpaty	Apusenské hory*
<b>jaro</b> březen, duben, květen	0,68	0,68	0,74	0,50
<b>léto</b> červen, červenec, srpen	0,72	0,69	0,72	0,52
<b>podzim</b> září, říjen, listopad	0,56	0,51	0,57	0,26
<b>zima</b> prosinec, leden, únor	0,41	0,38	0,47	0,10
roční průměr	0,60	0,57	0,62	0,35

\*vlastní výpočet

Pro zjištění poslední teplotní charakteristiky (*DD0*) bylo nutné pracovat s denními daty. Denní hodnoty byly z vypočtených (popř. dostupných) průměrných měsíčních hodnot za období 1961–1990 získány jejich interpolací (kubický spline) v softwaru R verze 3.0.2. Takto interpolované hodnoty poskytly data pro denní průměry za 1961–1990, z nichž dále bylo vymezeno souvislé období s denní teplotou  $> 0^{\circ}\text{C}$ . Za toto období byly jednotlivé průměrné denní teploty sečteny. Jde o metodiku, která byla použita v práci Kašpar a Tremli (2016).

Pro získání dat z rastru datasetu WorldClim byl použit program ArcMap verze 10.2. Hodnoty jednotlivých bodů rastru byly vyneseny do tabulky. Tato data byla pomocí vzorce uvedeného výše opět převedena na výšky polohy HHL, výška jednotlivých bodů byla zjištěna z rastru digitálního výškového modelu (DEM) pro Evropu. Z takto vyextrahovaných a přepočítaných dat byly vypočítány tytéž teplotní charakteristiky jako z dat KNMI (CRU). U třetí počítané charakteristiky (*DD0*) bylo nutné získat potřebná data opět interpolací.

Zjištěné výsledky vypočtené ze staničních dat byly pro celé období 1961–1990 zprůměrovány a následně porovnány výsledky teplotních charakteristik z databáze WorldClim. Porovnávání bylo zaměřeno na spolehlivost databáze WorldClim. Bylo tedy zjišťováno, jak moc se hodnoty teplotních charakteristik spočtených na základě dat z gridové databáze liší od teplotních charakteristik vypočtených na základě naměřených staničních dat.

## 8 Výsledky

### 8.1 Lokality, výšky, formy hranice lesa

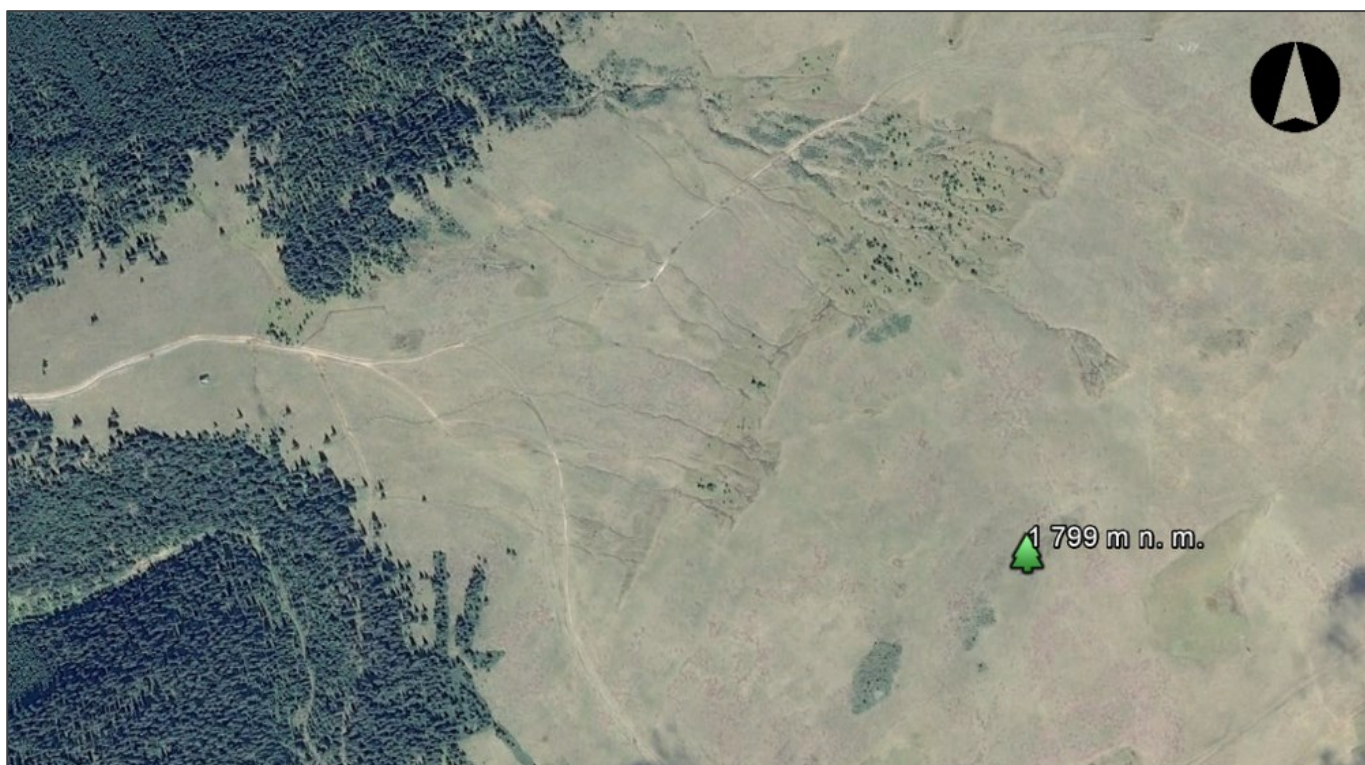
Poloha HHL se ve rámci zkoumané oblasti nachází od 1 742 do 2 024 m n. m. (Tabulka 5). Obecně nejnížší polohy HHL, tj. do 1 837 m n. m., vykazují oblasti ve Východních Karpatech (Pogegevsckaya, Rarau, Ceahlau Toaca) a Apusenské větvi Karpat (Baisoara), nejvýše položené HHL, tj. místy přesahující hranici 2 000 m n. m., lze nalézt v jižní části karpatského celku (Varful Omu, Paltinis).

*Tabulka 5: průměrná nadmořská výška zjištěných poloh HHL ve studovaných lokalitách, jejich vzdálenost od meteorologických stanic a zjištěná forma HHL*

lokality	průměrná nadmořská výška HHL [m n. m.]	přibližná vzdálenost stanice od HHL [km]	forma HHL
Baisoara	1 794	7,46	ostrá
Ceahlau Toaca	1 837	0,07	ostrá
Paltinis Romania	1 914	5,32	ostrá
Pogegevsckaya	1 738	1,94	difúzní
Rarau	1 742	6,47	ostrá + difúzní
Varful Omu	2 024	3,15	difúzní

Více než polovina vyhledaných HHL ve studovaných lokalitách utvářela ostrou formu (Tabulka 5). V těchto případech je však velmi často ze snímků patrný vliv lidské činnosti (Obrázek 7, 9 a 11), proto je třeba hovořit o přirozenosti těchto HHL opatrně. V lokalitě Rarau je kromě difúzní formy HHL na západním svahu formována na svahu východním i hranice difúzní. Situace je zde velmi pravděpodobně silně ovlivněna právě antropogenní činností (Obrázek 11). Vliv zde ovšem mohou mít i klimatické podmínky, např. převládající západní proudění. Dlouhodobě vanoucí větry mohou způsobovat formování právě ostré přechodové zóny a také to, že poloha HHL na západně orientovaném svahu je v důsledku tohoto položena níže než HHL na svahu východním. Nepřirozeně ostré hranice v důsledku působení člověka jsou ve vegetačním pokryvu patrné i v lokalitách Paltinis (Obrázek 9) a Baisoara (Obrázek 7).





Obrázek 7: snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Baisoara, výška pohledu cca 3,53 km (Google Earth)

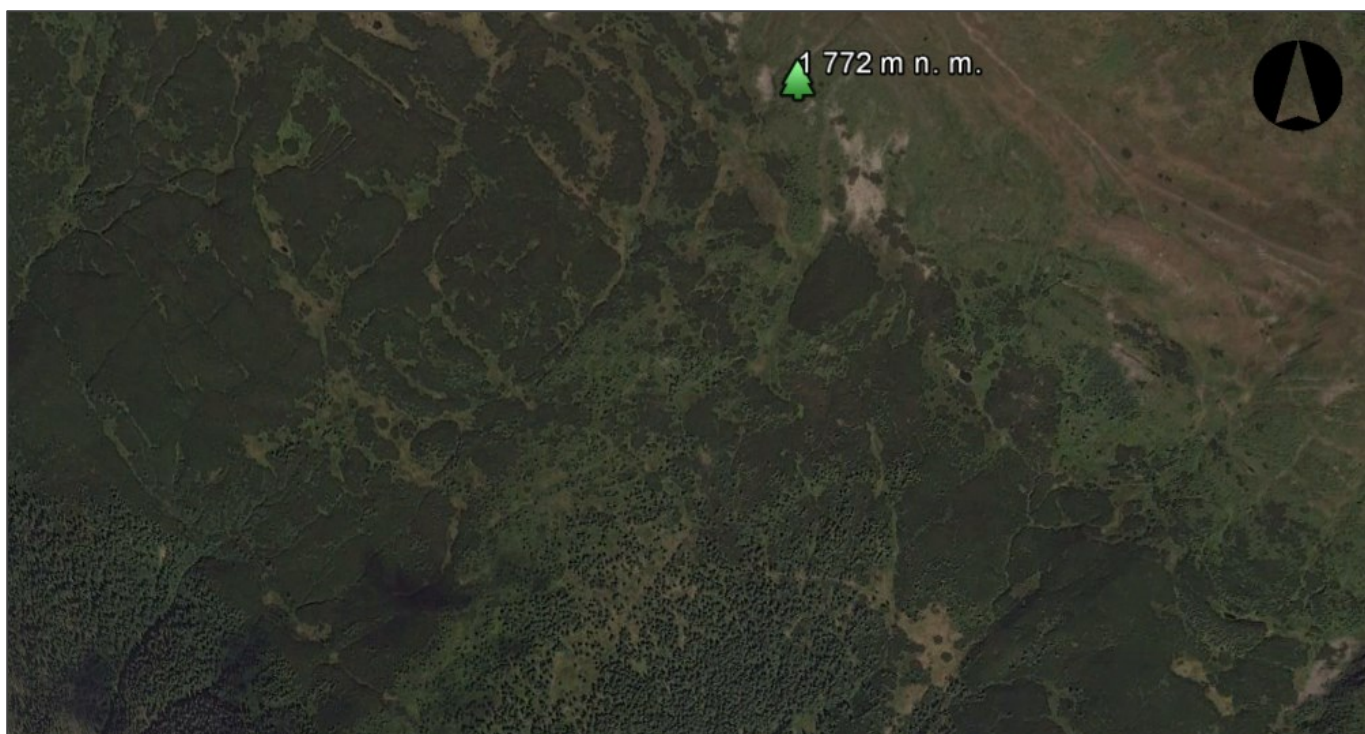


Obrázek 8: snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Ceahlau Toaca, výška pohledu cca 2,61 km (Google Earth);





Obrázek 9: snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Paltinis, výška pohledu cca 3,23 km (Google Earth)



Obrázek 10: snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Pogegevskaya, výška pohledu cca 3,65 km (Google Earth)





Obrázek 11: snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Rarau, výška pohledu cca 3,49 km (Google Earth)



Obrázek 12: snímek lokality nejvyšších poloh HHL v lokalitě Varful Omu, výška pohledu cca 3,21 km (Google Earth)

## 8.2 Teplotní charakteristiky pro lokality

Teplotní charakteristiky vypočítané ze staničních dat z období 1961–1990 pro studované lokality jsou uvedeny v Tabulce 6. Výsledky počítaných proměnných jsou doplněny o hodnoty ze studie Kašpar a Tremel (2016) počítané pro slovenskou část karpatského oblouku.

*Tabulka 6: vypočítané hodnoty teplotních charakteristik ze staničních dat pro jednotlivé lokality výskytu HHL*

lokality	$T_{NEJTEP}$ [°C]	$T_{ČER-ZÁŘ}$ [°C]	$DDO$ [°D]
	11,0 <sup>a)</sup>	10,1 <sup>a)</sup>	1 652 <sup>a)</sup>
Baisoara	10,1 <sup>b)</sup>	9,1 <sup>b)</sup>	1 404 <sup>b)</sup>
	10,5 <sup>c)</sup>	9,6 <sup>c)</sup>	1 526 <sup>c)</sup>
Ceahlau Toaca	9,6	8,2	1 234
Paltinis Romania	10,0	9,0	1 398
Pogegevskaia	9,7	8,3	1 162
Rarau	10,8	9,7	1 496
Varful Omu	8,4	7,1	1 021
Babia Góra*	9,7	8,5	1 293
Belianské Tatry*	9,3	8,2	1 237
Malá Fatra*	9,4	8,2	1 245
Nízké Tatry*	8,3	7,2	1 038
Velká Fatra*	10,0	8,7	1 338
Vysoké Tatry*	9,6	8,5	1 302
Západné Tatry*	9,8	8,6	1 317

*\*Kašpar a Tremel (2016)*

*Staniční data (1961–1990) byla na nadmořskou výšku polohy HHL v lokalitě Baisoara přepočítána za použití:*

*<sup>a)</sup> hodnoty výškového teplotního gradientu pro Apusenské hory,*

*<sup>b)</sup> hodnoty výškového teplotního gradientu pro Jižní Karpaty,*

*<sup>c)</sup> průměru hodnot výškových teplotních gradientů pro Apusenské hory a Jižní Karpaty.*



Při porovnání hodnot teplotních charakteristik spočtených v rámci této práce a výsledků předložených ve studii Kašpar a Tremel (2016) je zřejmá jejich podobnost, zejména prvních dvou proměnných. Při porovnání hodnot vypočtených pro polohy HHL ve dvou nejvyšších masivech – Vysokých Tatrách a lokalitě Varful Omu v pohoří Bucegi – jsou hodnoty pro Vysoké Tatry znatelně vyšší. Průměrná nadmořská výška HHL v této oblasti totiž nedosahuje ani 1 800 m n. m. (Kašpar a Tremel 2016), zatímco v lokalitě Varful Omu překračuje hranici 2 000 m n. m. Je to důsledek výrazné lidské činnosti v Západních Karpatech, která právě mj. ve Vysokých Tatrách vedla k dramatickému snížení polohy HHL (Plesník 1978, Czajka a kol. 2015b). Znatelný je rozdíl i ve třetí zjišťované teplotní charakteristice  $DDO$ . Poměrně vysoké hodnoty  $DDO$  oproti zbytku vykazují lokality Baisoara a Rarau. Na základě vlastností této teplotní charakteristiky lze říci, že nejteplejší HHL se nacházejí pravděpodobně v těchto lokalitách.

Při zpracovávání dat vedoucím k získání hodnot první vypočítávané teplotní charakteristiky  $T_{NEJTEP}$  byl poměrně dobře patrný přesun nejteplejšího období v roce z měsíce července, jenž je na většině území tohoto regionu měsícem s nejvyššími teplotními průměry, na pozdější srpen. Pouze ve dvou případech (lokalita Rarau a Pogegevskaia) tomu tak nebylo. V lokalitě Rarau však červencové teplotní průměry převyšovaly ty srpnové pouze v řádech tisícín  $^{\circ}\text{C}$ . Tento jev byl zjevný i během zpracovávání dat z databáze WorldClim. Jedinou změnou v tomto ohledu je oproti staničním datům lokalita Ceahlau Toaca, pro níž je podle dat z WorldClim nejteplejším měsícem červenec, nikoliv srpen.

Teplotní charakteristiky spočtené na základě dat z gridové databáze WorldClim vztažených ke zjištěným polohám HHL demonstruje Tabulka 7.

Tabulka 7: vypočítané hodnoty teplotních charakteristik z databáze WorldClim (1961–1990) pro jednotlivé lokality výskytu HHL

lokality	$T_{NEJTEP}$ [°C]	$T_{ČER-ZÁŘ}$ [°C]	$DDO$ [°D]
Baisoara	11,9 <sup>a)</sup>	10,8 <sup>a)</sup>	1 790 <sup>a)</sup>
	11,0 <sup>b)</sup>	9,8 <sup>b)</sup>	1 547 <sup>b)</sup>
	11,4 <sup>c)</sup>	10,3 <sup>c)</sup>	1 666 <sup>c)</sup>
Ceahlau Toaca	11,7	10,3	1 612
Paltinis Romania	10,0	8,8	1 340
Pogegevsckaya	10,9	9,6	1 480
Rarau	11,0	9,7	1 481
Varful Omu	9,7	8,3	1 268

Data z databáze současných klimatických podmínek (1961–1990) WorldClim byla na nadmořskou výšku polohy HHL přepočítána za použití:

<sup>a)</sup> hodnoty výškového teplotního gradientu pro Apusenské hory,

<sup>b)</sup> hodnoty výškového teplotního gradientu pro Jižní Karpaty,

<sup>c)</sup> průměru hodnot výškových teplotních gradientů pro Apusenské hory a Jižní Karpaty.

Při porovnání výsledků teplotních charakteristik vypočtených ze staničních dat a z gridové databáze WorldClim je patrné, že hodnoty opírající se o druhý jmenovaný zdroj dat jsou obecně vyšší (Tabulka 8). Hodnoty prvních dvou teplotních charakteristik ( $T_{NEJTEP}$  a  $T_{ČER-ZÁŘ}$ ) byly v průměru téměř o 0,9 °C vyšší ve prospěch hodnot vypočtených na základě staničních dat. Největší rozdíl mezi hodnotami obecně vykazovala lokalita Ceahlau Toaca. Teplotní rozdíl u prvních dvou zjišťovaných teplotních charakteristik ( $T_{NEJTEP}$  a  $T_{ČER-ZÁŘ}$ ) byl mezi databází WorldClim a staničními daty v obou případech 2,1 °C, což je nejvíce ze všech zkoumaných oblastí. Také pro  $DDO$  vykazovala lokalita Ceahlau Toaca největší odchylku – hodnota stanovená na základě staničních dat byla nižší o 378 °D. Naopak největší shoda vyšla najevo v případě lokality Rarau. Hodnota  $T_{NEJTEP}$  počítaná ze staničních dat se téměř shodovala s databází WorldClim. Hodnota vypočtená ze staničních dat byla jen o 0,199 °C menší. V případě druhé charakteristiky  $T_{ČER-ZÁŘ}$  se hodnoty lišily pouze o 0,003, hodnota pro staniční data byla opět menší. Největší shoda ve třetí zkoumané teplotní charakteristice  $DDO$  se projevila taktéž v hodnotách pro lokalitu Rarau – hodnoty získané ze staničních dat převýšily hodnotu vypočtenou na základě dat WorldClimu o pouhých 15,2 °D.

*Tabulka 8: porovnání průměrných hodnot teplotních charakteristik spočítaných na základě staničních dat a databáze WorldClim*

<b>průměr (1961–1990)</b>	<b><math>T_{NEJTEP}</math> [°C]</b>	<b><math>T_{ČER-ZÁŘ}</math> [°C]</b>	<b><math>DD0</math> [°D]</b>
staniční data (popř. CRU)	9,8	8,7	1306,2
databáze WorldClim	10,8	9,5	1474,5

*K vypočtení průměrů teplotních charakteristik byla pro stanici Baisoara použita pouze hodnota počítaná podle <sup>c)</sup> průměru výškových teplotních gradientů pro Apusenské hory a Jižní Karpaty.*

Rozdíly mezi hodnotami teplotních charakteristik, tedy mezi staničními daty a databází WorldClim, lze připisovat možným nepřesnostem při vyhledávání poloh HHL, stanovování výšek potřebných pro přepočty teplot apod. Zásadní roli hraje také to, že jeden ze zdrojů dat je gridovou databází, tudíž hodnoty jsou vždy interpolovány v rámci jedné buňky. To může působit problémy zejména ve výrazně vertikálně členitých oblastech, kterými Karpaty jistě jsou. Z dosažených výsledků nelze zcela přímo říci, zda je databáze WorldClim natolik spolehlivá, aby mohla vhodně doplňovat neexistující staniční data řídké sítě meteorologických stanic. Ze srovnání výsledků je patrné, že v některých lokalitách (př. lokalita Rarau) je přesnost databáze WorldClim poměrně vysoká, jinde (př. lokalita Ceahlau Toaca) méně. Je důležité zmínit, že přesnost dat z WorldClimu je podstatně ovlivněna tím, ze kterých stanic jsou data v buňce gridové databáze obsažena.

## 9 Diskuze

Cílem této práce bylo vyhledání nejvyšších poloh HHL v Karpatském oblouku v blízkosti meteorologických stanic ve vyšších nadmořských výškách. Výsledky této práce navazují na studii Kašpar a Tremel (2016), jež se zabývá polohou HHL a jejími teplotními charakteristikami v pohoří Střední Evropy. Jelikož je v této studii zahrnuta i část Karpat na území Slovenska, zaměřuje se tato práce na jejich zbytek, tj. oblasti ležící v Rumunsku a na Ukrajině.

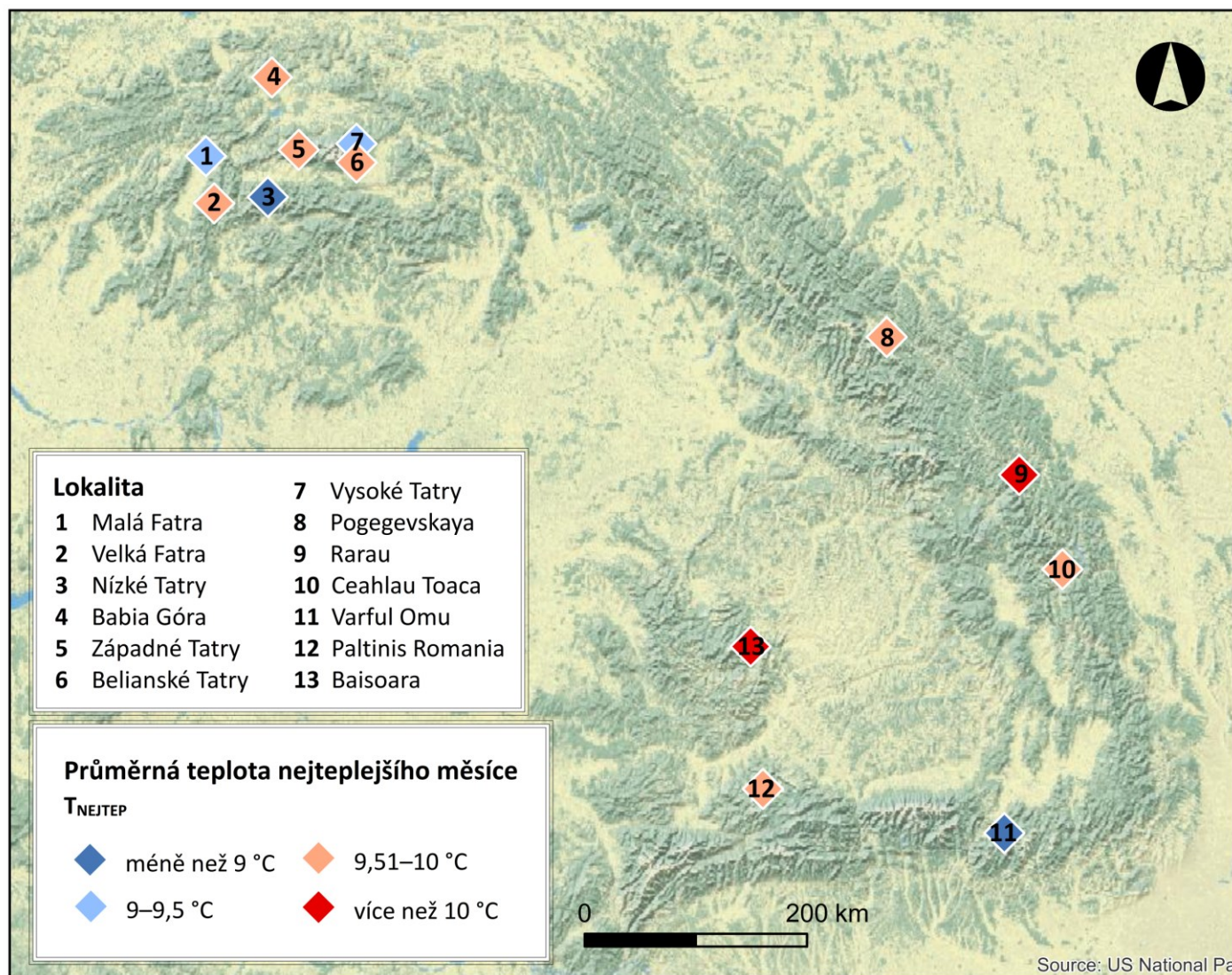
### 9.1 Srovnání v rámci Karpat

Výsledné hodnoty teplotních charakteristik počítaných pro oblasti výskytu HHL dokazují, že karpatské HHL se vyskytují pod svým klimatickým limitem. Körner a Paulsen (2004) uvádějí prahové hodnoty teplot, jež jsou stěžejními pro existenci HHL. Pro průměrnou teplotu vzduchu během vegetačního období tento práh podle autorů představuje hodnota  $6,7 \pm 0,8$  °C. Z výsledků zjištěných teplotních charakteristik pro nejvyšší polohy HHL v Karpatech je zřejmé, že většina z nich znatelně převyšuje stanovenou prahovou hodnotu. Jediným zaznamenaným místem, které se na základě Körnerova a Paulsenova (2004) stanoveného prahu nachází v příslušném intervalu, je nejvýše položená HHL v lokalitě Varful Omu. Z výsledků publikovaných Kašparem a Tremlem (2016) do intervalu zapadá také pouze jedna lokalita, Nízké Tatry. Hodnoty průměrné teploty nejteplejšího období ( $T_{\text{ČER-ZÁŘ}}$ ), jež lze považovat hodnoty průměrných teplot vegetačního období, jsou pro Varful Omu 7,1 °C, pro masiv Nízkých Tater 7,2 °C.

Na základě teplotních charakteristik, jejichž výsledky odhalily nedosažení teplotních limitů na HHL ve většině případů, by bylo možné předpokládat postup HHL do vyšších poloh. Podle Weisberga a kol. (2013) a Czajky a kol. (2015) je antropogenní činnost v Karpatech jedním z nejdůležitějších determinantů polohy HHL. Jejich studie pojednávají o HHL zcela jednoznačně antropogenního původu a uvažují vliv rozličných způsobů lidského působení v oblasti. V tom se zásadně liší od přístupu k problematice v této práci.

Vypočítané hodnoty teplotních charakteristik ( $T_{\text{NEJTEP}}$ ,  $T_{\text{ČER-ZÁŘ}}$  a  $DDO$ ) byly pro jejich zřetelnější rozložení v rámci karpatského celku zaneseny do map (Obrázek 13, 14 a 15). Ze všech obrázků je patrné, že HHL ve slovenské části Karpat jsou obecně o něco chladnější než jižní a východní část pohoří. Důvodem mohou být i rozdílné socioekonomické důvody v jednotlivých státech. Zatímco na Slovensku a Polsku byla lidská činnost (pastevectví) ve vyšších polohách omezována již od 2. světové války (Plesník 1978), v ostatních částech Karpat výrazný pokles míry využití krajiny v horských oblastech nastal až v 90. letech minulého století (Munteanu a kol.

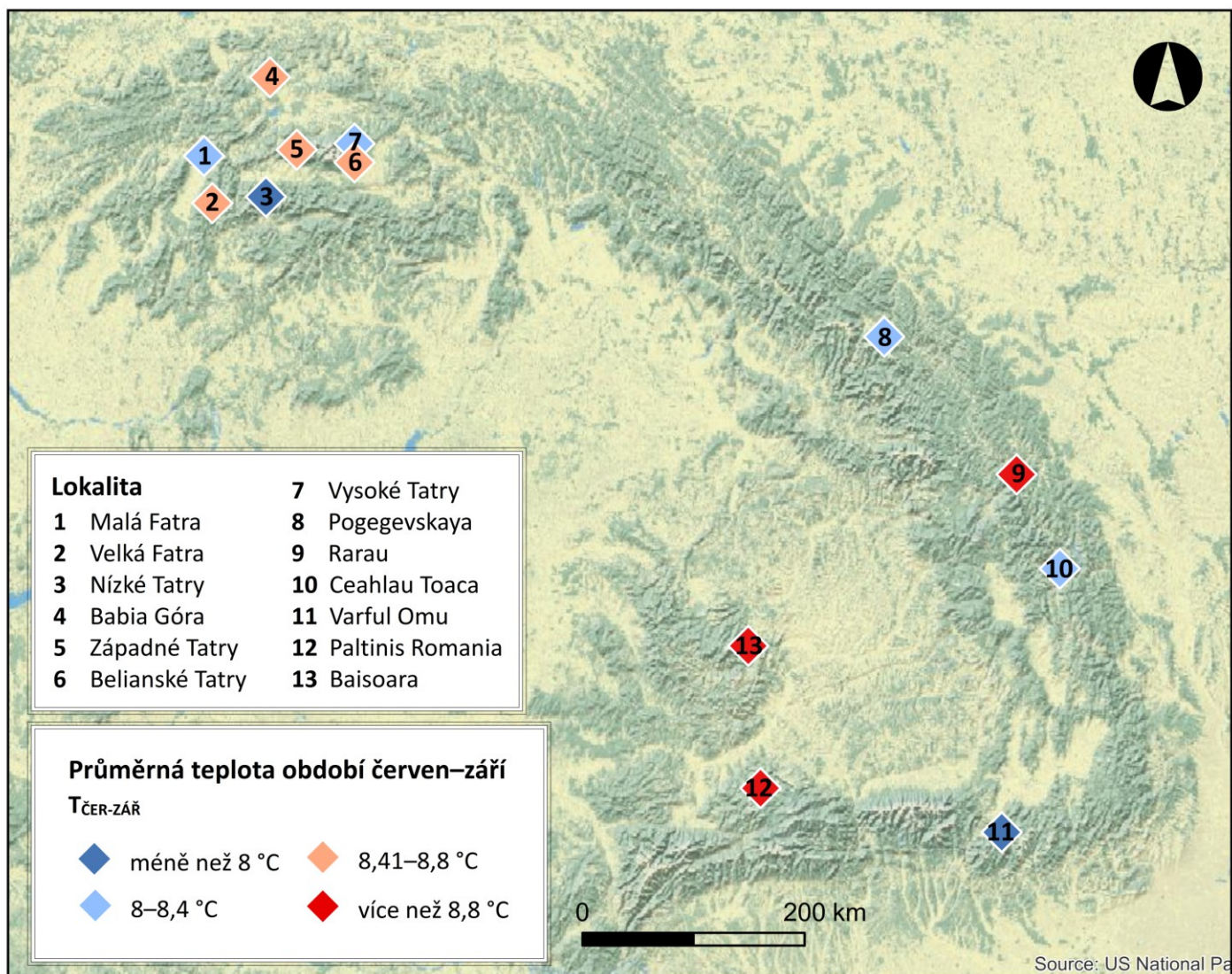
2014). HHL v těchto oblastech tím pádem bez výrazného lidského působení neexistují tak dlouhou dobu, a nacházejí se proto v nižších polohách. Je důležité si uvědomit, že v takto nízkých pohořích je na mnoha místech poměrně pravděpodobné, že hodně oblastí na teplotně limitovanou HHL zkrátka nedosahuje. Stávající HHL jsou tak pouze výsledkem působení člověka.



Obrázek 13: Průměrná teplota nejteplejšího měsíce ( $T_{NEITEP}$ ) na HHL ve studovaných karpatských oblastech.

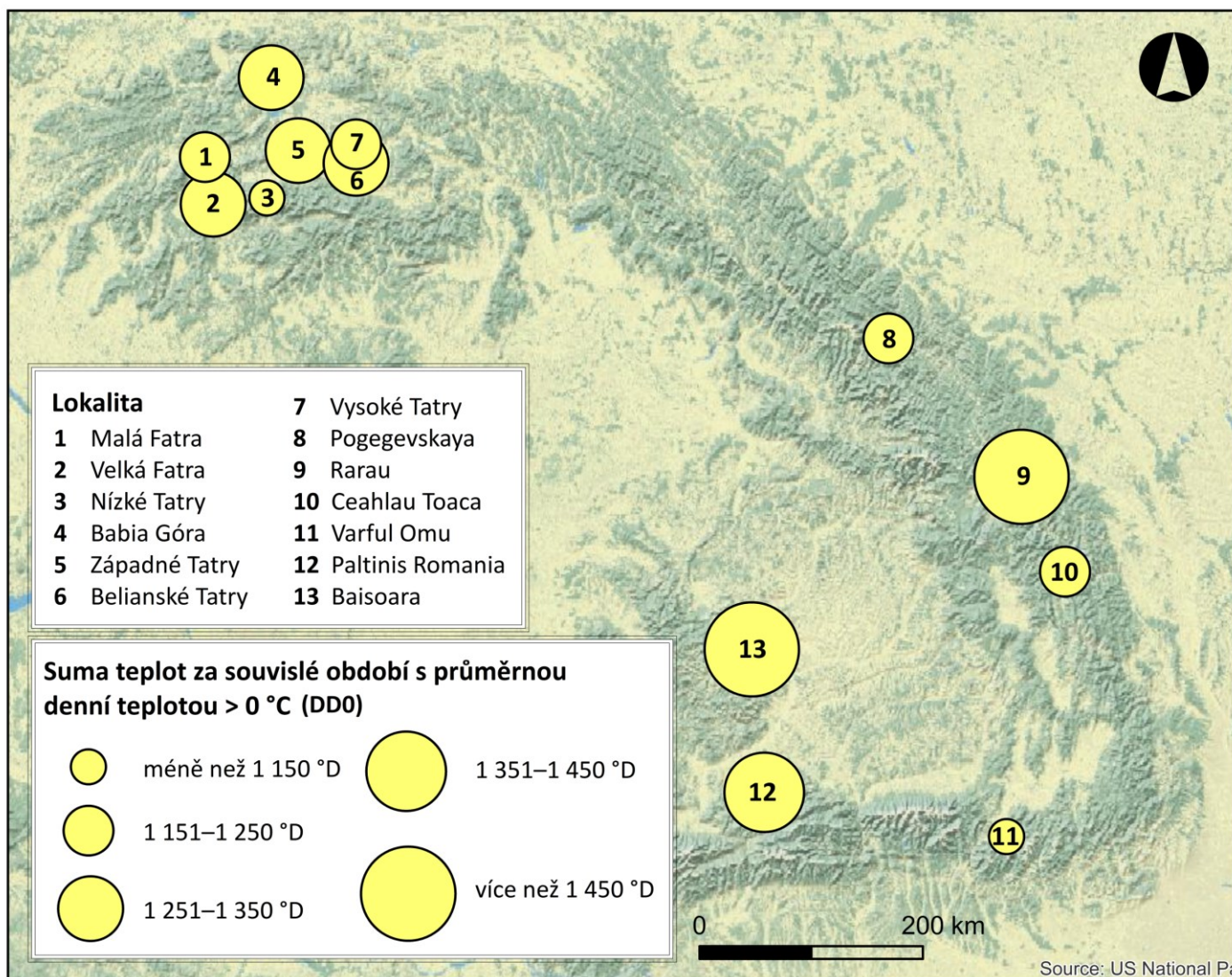
Ačkoliv Martazinova a kol. (2011) poukazují v oblasti ukrajinských Karpat na rostoucí teploty během roku vlivem změn v atmosférické cirkulaci, oblast Pogegevsckaya je stále relativně chladnou ( $T_{ČER-ZÁŘ}$ , Obrázek 14).





Obrázek 14: Průměrná teplota nejteplejšího období ( $T_{\text{ČER-ZÁŘ}}$ ) ve studovaných karpatských oblastech.





Obrázek 15: suma teplot za souvislé období s průměrnou denní teplotou nad 0 °C (DD0) ve studovaných karpatských oblastech

V rámci zkoumaného regionu je z hodnot vypočtených teplotních charakteristik patrný jejich předpokládaný pokles s rostoucí nadmořskou výškou. Vyskytuje se zde však několik anomálií. Podle Czajky a kol. (2015b) má v obecném měřítku nejdůležitější vliv na polohu HHL v Karpatech právě MEE. Autoři zároveň upozorňují, že je obtížné oddělit vliv působení tohoto fenoménu od vlivu zeměpisné šířky kvůli poměrně složitému tvaru karpatského pohoří. Na základě toho tvrdí, že MEE má na polohu HHL v Karpatech větší vliv než zeměpisná šířka. Pravděpodobně i díky tomuto jevu se HHL v pohoří Bucegi může nacházet nad hranicí 2 000 m n. m. Nejteplejší HHL se nachází v lokalitě Rarau, teplotní charakteristiky jsou zde o více než 1 °C vyšší, než je průměr všech zkoumaných oblastí. Vrchol, na němž byla zjišťována poloha HHL, je nejvyšším v okolí, a tedy i poměrně exponovaným vůči klimatickým podmínkám. Ačkoliv

je možné situaci v oblasti vysvětlit působením vrcholového fenoménu, ve skutečnosti je zde poloha i podoba HHL ovlivňována spíše antropogenní činností než průběhem teplot.

Na většině území Karpat v oblastech výskytu HHL hraje v jejím utváření největší roli lidská činnost (Weisberg a kol. 2013), jež je některými autory považována za nejvýznamnějšího činitele (např. Sitko a Troll 2008). Zejména na území Ukrajiny ovlivňuje polohu HHL pastevectví v letním období (Martazinova a kol. 2011), proto v dlouhodobějším měřítku zde HHL oproti jiným lokalitám vykazují relativní stabilitu (Weisberg a kol. 2013).

## **9.2 Srovnání s ostatními evropskými pohořími**

Kašpar a Treml (2016) ve své studii zabývající se pohořími Střední Evropy odhalili trend rostoucí průměrné nadmořské výšky HHL v západovýchodním směru. Podél 50° s.š. se ve zkoumaných oblastech poloha HHL zvedá o zhruba 94 m na každých 100 km. Tento jev je odrazem především vzrůstající míry kontinentality klimatu směrem na východ, tedy posunem 10°C izoterm nejteplejšího měsíce do vyšších poloh (Květoň 2001). Podle Mikoláškové (2009) je kontinentalita klimatu důležitou základní charakteristikou každé oblasti, neboť ovlivňuje množství srážek, oblačnost a tím i mj. množství sluneční radiace. Ta může mít v oblasti výrazný vliv na chod teplot (Treml a Banaš 2008), jež jsou stěžejními pro existenci ekotonu HHL. Slábnoucí vliv oceánu na podnebí lze dobře pozorovat v pohořích vyvrásněných v rovnoběžkovém směru, tj. západovýchodním (např. Alpy, pohoří ve Střední Evropě). Podle Barryho (1994) právě např. Alpy díky tomuto disponují ve srovnání s Karpatami poměrně stabilními a jasně popsitelnými teplotními i srážkovými podmínkami. V Karpatech je vliv k východu narůstajícího vlivu kontinentality obtížně pozorovatelný zejména z důvodu obloukovitého tvaru pohoří (Kondracki 1978 v Czajka a kol. 2015b). Rozdíly v hodnotách zjišťovaných teplotních charakteristik mezi Alpami, pohořími Střední Evropy a rumunských a ukrajinských Karpat jsou na základě Kašpara a Tremla (2016) názorně ilustrovány v Tabulce 9.



Tabulka 9: teplotní charakteristiky některých oblastí výskytu HHL v Alpách, pohoří Střední Evropy (CENA) a Karpatech; dle Kašpar a Tremli (2016), upraveno

region	poloha	nadmořská výška HHL [m n. m.]	$T_{NEJTEP}$ [°C]	$T_{ČER-ZÁŘ}$ [°C]	$DD0$ [°D]	zdroj
Mt. Patscherkofel	47° S 11° V	2 070	9	7,7	1 115	staniční data
Villacher Alps	47° S 13° V	2 050	9,3	8,1	1 193	staniční data
Andermatt/Gütsch	–	2 200	8,2	6,8	934	staniční data
Säntis	47° S 9° V	1 900	8,4	7,3	1 146	staniční data
CENA	–	–	$9,5 \pm 0,6$	$8,4 \pm 0,5$	$1\,272 \pm 112$	Kašpar a Tremli (2016)
Karpaty (UA, RO)	–	–	$9,8 \pm 0,8$	$8,7 \pm 0,9$	$1\,306 \pm 183$	tato práce

Průměrné hodnoty teplotních charakteristik vztažených k polohám HHL vč. směrodatných odchylek ( $\pm SD$ ) vypočtené z dat dostupných ze serveru KNMI a NOAA za období 1961–1990, chybějící hodnoty byly dopočítány regresí s daty CRU.

Jak je z Tabulky 9 patrné, hodnoty teplotních charakteristik jsou pro ukrajinské a rumunské Karpaty, tedy zájmovou oblast této práce, nejvyšší. Zároveň tato data vykazují větší variabilitu než data pro CENA publikovaná Kašparem a Tremlem (2016). Tato variabilita naměřených hodnot pro sledovanou oblast může být způsobena právě zmíněnou nesourodostí podmínek v Karpatech. Jednotně vysvětlit teplotní charakteristiky na HHL v karpatské oblasti podobně, jak učinili Kašpar a Tremli (2016) pro pohoří Střední Evropy, je vzhledem k uvedeným okolnostem velice obtížné. Zřetelné rozdíly jsou, zjednodušeně řečeno, způsobeny rozdílným nastavením mezoklimatu. Nižší hodnoty teplotních charakteristik pro CENA jsou jistě ovlivněny převládajícím západním prouděním. Pohoří Střední Evropy vč. Západních Karpat vlivem tohoto jevu vystaveny silným větrům, značné oblačnosti a výskytu orografických srážek (Barry 2008). Oproti tomu rozlehlé horské masivy Jižních Karpat v Rumunsku přicházejí do styku s teplými a suchými vzdušnými masami proudícími z afrického kontinentu (Czajka a kol. 2015b). Na základě těchto faktů a srovnání dat v Tabulce 9 lze tedy tvrdit, že průběhy teplot v oblastech ekotonu HHL jsou v ukrajinských a rumunských Karpatech o něco vyšší než v sousedních evropských horských masivech, zejména ve Střední Evropě a Alpách.

### 9.3 Nejistoty

Podobné výzkumy v karpatské oblasti jsou značně znesnadňovány především řídkou sítí meteorologických stanic. Pokud datové záznamy existují, často nejsou dostatečně dlouhé nebo kompletní. V případě stanic, které poskytují pouze denní záznamy, bylo nutné zjištění toho, jak velký podíl naměřených hodnot v každém měsíci chybí. Pokud chybějící data v měsíci přesahovala hranici 20 %, nebyla data pro tento měsíc použita a měsíční teplotní průměr byl dopočítán regresí s daty CRU. Dobrým příkladem stanic s nedostatečnými údaji je ukrajinská stanice Pogegevska. Ze 120 měsíců dat dostupných ze serveru KNMI byla po zhodnocení chybějících hodnot pro jednotlivé měsíce použitelná pouze jejich desetina. Meteorologická stanice na vrcholu Omu jako jediná poskytovala ucelenou datovou řadu měsíčních průměrů za celé sledované období, data tedy byla ponechána v původní podobě. Pro většinu stanic však musela být chybějící nebo nedostatečná staniční data získaná z KNMI dopočítávána regresí z největšího možného intervalu prostřednictvím datasetu CRU TS 4.00. Tento postup pochopitelně může vést ke zkreslení výsledků, obzvláště v případě lokality Pogegevska, kdy byl počet měsíců s nedostatečnými daty velmi vysoký. Bylo nicméně považováno za vhodné, aby byla alespoň jedna meteorologická stanice, tedy alespoň nějaká data, z ukrajinské části Karpat zahrnuta. Výsledné hodnoty zjištěných teplotních charakteristik tak mohou být vzhledem k nedostatečným údajům zatíženy chybou.

Vedle kvality dat ovlivněné i způsobem jejich zpracování samozřejmě silně záleží také na použitých hodnotách výškových teplotních gradientů. Zvláště pro lokalitu Baisoara, kde byly hodnoty teplotního gradientu počítány v páru s daty poskytnutými nejbližší a zároveň nejnižší položenou meteorologickou stanicí v Kluži, je riziko nepřesností značné. V tomto případě se, jak je patrné z Tabulky 4, hodnoty totiž poměrně hodně liší od hodnot stanovených autory Micu a kol. (2015) pro ostatní části Karpat. Tato situace má dvě možná vysvětlení. Prvním z nich je předpoklad toho, že se výše položená stanice (Baisoara) nachází na výjimečně exponovaném místě, které je spojeno s průběhem obecně nižších teplot. Vzhledem však ke skutečnosti, že už průměry měsíčních průměrů získaných ze serveru KNMI jsou pro meteorologickou stanici Cluj-Napoca evidentně nižší než pro stanici Baisoara, bude pravděpodobnější varianta druhá. Klužská stanice se tedy pravděpodobně nachází v kotlině, kde je díky zimním inverzím průběh teplot zejména v zimním období nižší, než by příslušelo dané nadmořské výšce a poloze místa obecně. Pro porovnání byly teplotní charakteristiky pro HHL v oblasti Baisoara propočítány třikrát (Tabulka 6). K zjištění <sup>a)</sup> hodnot sloužila hodnota výškového teplotního gradientu pro Apusenskou větev Karpat (spočtená na základě dat meteorologických stanic Baisoara a Cluj-

Napoca), <sup>b)</sup> hodnoty vyšly po použití výškového teplotního gradientu pro nejbližší oblast Karpat, tj. Jižních. Poslední <sup>c)</sup> hodnoty byly zjištěny za použití průměru dvou hodnot zmíněných výškových teplotních gradientů.

S možnými nepřesnostmi přepočtů staničních dat na polohy HHL jsou spjaty i rozdíly nadmořských výšek a vzdálenost meteorologické stanice a zjištěné polohy HHL. Vesměs nejnižší položené stanice se nacházejí nejdále od poloh HHL. Relativně velká vzdálenost HHL od meteorologické stanice je i v nejvýše položené lokalitě Varful Omu. Zde je to způsobené však vysokou nadmořskou výškou meteorologické stanice a obecně rozlehlostí masívu Bucegi, nikoliv vyloženě rozdílnou lokalizací oproti HHL.

Vedle zjišťovaných teplotních charakteristik by dále bylo vhodné zjištění doby trvání vegetačního období v oblastech výskytu HHL, neboť délka vegetačního období je faktorem významně ovlivňujícím existenci HHL (Paulsen a Körner 2004). Podle této teplotní charakteristiky by se dalo spolehlivěji určit, jak blízko je stávající poloha HHL ke svému teplotnímu limitu.

Obecně je obtížné stanovit, do jaké míry je poloha HHL v Karpatech utvářena podnebnými podmínkami, zejména teplotou. Ačkoliv např. Kern a Popa (2008) připisují v Kalimanských horách postup HHL do vyšších poloh růstu zimních teplot, v rámci karpatského celku je podle některých autorů (např. Sitko a Troll 2008, Martazinova a kol. 2011, Weisberg a kol. 2013) rozhodujícím faktorem stále míra využití krajiny člověkem.

## 10 Závěr

Tato práce ve své teoretické rešeršní části poskytuje v obecné rovině přehled o problematice existence a utváření HHL na základě aktuální literatury. Svou praktickou částí pak v jistém směru částečně doplňuje předešlou studii zabývající se polohou HHL a jejími teplotními charakteristikami v pohořích Střední Evropy, vč. části karpatského oblouku na území Slovenska (Kašpar a Trembl 2016).

V co možná nejbližším okolí šesti vyhledaných karpatských meteorologických stanic v nadmořské výšce přesahující 1 300 m n. m. byly vyhledány nejvyšší polohy HHL. Dostupná staniční data byla pomocí výškových teplotních gradientů přepočítána na zjištěné průměrné nadmořské výšky polohy HHL, a z nich byly vypočítány tři teplotní charakteristiky: průměrná teplota nejteplejšího měsíce ( $T_{NEJTEP}$ ), průměrná teplota období červen až září ( $T_{ČER-ZÁŘ}$ ) a teplotní suma za souvislé období s průměrnou denní teplotou nad 0 °C ( $DD0$ )

V Karpatech hraje ohledně postupu HHL významnou roli i míra lidské činnosti (Sitko a Troll 2008). Poloha HHL je však i v této oblasti, podobně jako v dalších evropských pohořích (např. Gehrig-Fasel a kol. 2007, Motta a kol. 2006) nejpravděpodobněji ovlivněna kombinací působení změny klimatu a způsobu využití krajiny. V západovýchodním směru zcela jistě hraje roli zvyšující se míra kontinentality. Pro Karpaty může být důležitým i efekt hmotnatosti pohoří nebo vrcholový fenomén. Jelikož však Karpaty nejsou pohořím příliš vysokým, je zde velká pravděpodobnost toho, že mnohé jejich vrcholy na výšku lesa zkrátka přirozeně nedosahují. Existující HHL jsou v některých takových oblastech nepřirozeným krajinným prvkem, jenž vznikl působením člověka.

Zjištěné teplotní charakteristiky by bylo možné rozšířit o několik dalších proměnných, zejména o dobu trvání vegetačního období v jednotlivých oblastech. Na základě teplotního prahu pro průměrnou teplotu vegetačního období ( $6,5 \pm 0,8$  °C) určenou Paulsenem a Körnerem (2004) bylo stanoveno, že pouze v lokalitě Varful Omu existuje HHL ( $T_{ČER-ZÁŘ} = 7,1$  °C) v relativní blízkosti svého teplotního limitu. Z předchozí studie (Kašpar a Trembl 2016) toto kritérium splňuje taktéž pouze jedna lokalita – masiv Nízkých Tater ( $T_{ČER-ZÁŘ} = 7,2$  °C). Vyšší hodnoty ostatních lokalit zřetelně překračují tuto mez. Vyplývá z toho tedy, že většina vyhledaných HHL v karpatském oblouku leží pod svým teplotním limitem. Není tedy ovlivňována primárně teplotou, ale jinými faktory. Pokud jde o měnící se klimatické podmínky (rostoucí teplotu), nelze tedy ve většině těchto oblastí předpokládat jasný postup HHL do vyšších poloh.

## 11 Seznam použité literatury

- AMEZTEGUI, A., BROTONS, L., COLL, L. (2010):** Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography*, 19: s. 632–641.
- AMEZTEGUI, A., COLL, L., BROTONS, L., NINOT, J. M. (2016):** Land-use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain tree line in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography*, 25: 1–11.
- BARRY, R. G. (1994):** Past and potential future changes in mountain environments: A review. In: Beniston, M.: *Mountain environments in changing climates*. Routledge Publishing Company, London-New York.
- BARRY, R. G. (2008):** *Mountain weather and climate*. Cambridge University Press, Cambridge.
- BOLTIŽIAR, M., (2007):** Štruktúra vysokohorskej krajiny Tatier (veľkomierkové mapovanie, analýza a hodnotenie zmien aplikáciou údajov diaľkového prieskumu Zeme). FPV UKF, Nitra.
- BOURIAUD, O., POPA, I. (2009):** Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees*, 23: s. 95–106.
- CAMARERO, J. J., GUTIÉRREZ, E. (2004):** Pace and pattern of recent treeline dynamics: Response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change*, 63: s. 181–200.
- CASALEGNO, S., AMATULLI, G., CAMIA, A., NELSON, A., PEKKARINEN, A. (2010):** Vulnerability of *Pinus cembra* L. in the Alps and the Carpathian Mountains under present and future climates. *Forest Ecology and Management*, 259: s. 750–761.
- CZAJKA, B., ŁAJCZAK, A., KACZKA, R. J., NICIA, P. (2015a):** Timberline in the Carpathians: an overview. *Geographia Polonica*, 88(2): s. 7–34.
- CZAJKA, B., ŁAJCZAK, A., KACZKA, R. J. (2015b):** Geographical characteristics of the timberline in the Carpathians. *Geographia Polonica*, 88(2): s. 35–54.
- DA RONCH, F., CAUDULLO, G., TINNER, W., DE RIGO, D. (2016):** *Larix decidua* and other larches in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayán, J. a kol.: *European Atlas of Forest Tree Species*. Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- DIRNBÖCK, T., DULLINGER, S., GRABHERR, G. (2003):** A regional impact assessment of climate and land-use change on alpine vegetation. *Journal of Biogeography*, 30: s. 401–417.
- DOLEŽAL, J., ŠRŮTEK, M. (2002):** Altitudinal changes in composition and structure of mountain-temperate vegetation: a case study from Western Carpathian. *Plant Ecology*, 158: s. 201–221.

- DRAGOTĂ, C.-S., KUČSICA, G. (2011):** Global climate change-related particularities in the Rodnei mountains national park. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 6(1): s. 43–50.
- DUMITRESCU, A., BIRSAN, M.-V. (2015):** ROCADA: a gridded daily climatic dataset over Romania (1961–2013) for nine meteorological variables. *Natural Hazards*, 78(2): s. 1045–1063.
- ELLIOT, G. P. (2011):** Influences of 20th-century warming at the upper tree line contingent on local-scale interactions: evidence from a latitudinal gradient in the Rocky Mountains, USA. *Global Ecology and Biogeography*, 20: s. 46–57.
- FEURDEAN, A., GAŁKA, M., TANȚĂU, I., GEANTĂ, A., HUTCHINSON, S. M., HICKLER, T. (2015):** Tree and timberline shifts in the northern Romanian Carpathians during the Holocene and the responses to environmental changes. *Quaternary Science Reviews*, 134: s. 100–113.
- FEURDEAN, A., FLORESCU, G., VANNIÈRE, B., TANȚĂU, I., O'HARA, R. B., PFEIFFER, M., HUTCHINSON, S. M., GAŁKA, M., MOSKAL-DEL HOYO, M., HICKLER, T. (2016):** Fire has been an important driver of forest dynamics in the Carpathian Mountains during the Holocene. *Forest Ecology and Management*, 389: s. 15–26.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., SANJUÁN, Y., GIL-ROMERA, G., GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P., BEGUERÍA, S., ARNÁEZ, J., COBA-PÉREZ, P., GÓMEZ-VILLAR, A., ÁLVAREZ-MARTÍNEZ, J., LANA-RENAULT, N., PÉREZ-CARDIEL, E., LÓPEZ DE CALLE, C. (2016):** Mid and late Holocene forest fires and deforestation in the subalpine belt of the Iberian range, northern Spain. *Journal of Mountain Science*, 13(10): s. 1760–1772.
- GEHRIG-FASEL, J., GUISIAN, A., ZIMMERMANN, N. E. (2007):** Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate chase or land abandonment? *Journal of Vegetation Science*, 18: s. 571–582.
- GEHRIG-FASEL, J., GUISIAN, A., ZIMMERMANN, N. E. (2008):** Evaluating thermal treeline indicators based on air and soil temperature using an air-to-soil temperature transfer model. *Ecological Modelling*, 213: s. 345–355.
- GRACE, J., ALLEN, S. J., WILSON, C. (1989):** Climate and the meristem temperatures of plant communities near the tree-line. *Oecologia*, 79: s. 198–204.
- GRACE, J., BERNINGER, F. & NAGY, L. (2002):** Impacts of climate change on the tree line. *Annals of Botany*, 90: s. 537–544.
- GREENWOOD, S., JUMP, A. S. (2014):** Consequences of treeline shifts for the diversity and function of high altitude ecosystems. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4): s. 829–840.
- GRODZIŃSKA, K., GODZIK, B., FRĄCZEK, W., BADEA, O., OSZLÁNYI, J., POSTELNICU, D., SHPARYK, Y. (2004):** Vegetation of the selected forest stands and land use in the Carpathian Mountains. *Environmental Pollution*, 130: s. 17–32.

- HAN, A. R., LEE, S. K., SUH, G. U., PARK, Y., PARK, P. S. (2012):** Wind and topography influence the crown growth of *Picea jezoensis* in a subalpine forest on Mt. Deogyu, Korea. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166–167: s. 207–214.
- HARRIS, I., JONES, P. D., OSBORN, T. J., LISTER, D. H. (2014):** Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34: s. 623–642.
- HARSCH, M. A., HULME, P. E., MCGLONE, M. S., DUNCAN, R. P. (2009):** Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12: s. 1040–1049.
- HARSCH, M. A., BADER, M. Y. (2011):** Treeline form – a potential key to understanding treeline dynamics. *Global Ecology and Biogeography*, 20: s. 582–596.
- HERRICK, G. T., FRIEDLAND, A. J. (1991):** Winter desiccation and injury of subalpine red spruce. *Tree Physiology* 8(1): s. 23–36.
- HERTEL, D., SCHÖLING, D. (2011):** Below-ground response of Norway spruce to climate conditions at Mt. Brocken (Germany)—A re-assessment of Central Europe’s northernmost treeline. *Flora*, 206: s. 127–135.
- HIJMANS, R. J., CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G., JARVIS, A. (2005):** Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: s. 1965–1978.
- HOCH, G., KÖRNER, Ch. (2012):** Global patterns of mobile carbon stores in trees at the high-elevation tree line. *Global Ecology and Biogeography*, 21: s. 861–871.
- HOLTMEIER, F.-K., BROLL, G. (2005):** Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography*, 14: s. 395–410.
- HOLTMEIER, F.-K. (2009):** Mountain timberlines ecology: Patchiness and dynamics. Springer, New York.
- HOLTMEIER, F.-K., BROLL, G. (2009):** Altitudinal and Polar Treelines in the Northern Hemisphere – Cause and Response to Climate Change. *Polarforschung*, 79: s. 139–153.
- IRL, S. D. H., ANTHELME, F., HARTER, D. E. V., JENTSCH, A., LOTTER, E., STEINBAUER, M. J., BELERKUHNLIN, C. (2015):** Patterns of island treeline elevation – a global perspective. *Ecography*, 39: s. 427–436.
- JENÍK, J. (1961):** Alpínská vegetace Krkonoš, Hrubého Jeseníku a Králického Sněžníku. Československá akademie věd, Praha.

- JOBÁGY, E. G., JACKSON, R. B. (2000):** Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres. *Global Ecology and Biogeography*, 9: s. 253–268.
- KAŠPAR, J., TREML, V. (2016):** Thermal characteristics of alpine treelines in Central Europe north of the Alps. *Climate Research*, 68: s. 1–12.
- KAŠPAR, J., HOŠEK, J., TREML, V. (2017):** How wind affects growth in treeline *Picea abies*. *Alpine Botany*, 127(1): s. 1–12.
- KERN, Z., POPA, I. (2008):** Changes of frost damage and treeline advance for Swiss stone pine in the Calimani Mts. (Eastern Carpathians, Romania). *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 4: s. 39–48.
- KONČEK, M., ORLICZ, M. (1974):** Teplotné pomery. In Konček, M. a kol.: *Klíma Tatier*. Veda, Bratislava.
- KOZAK, J. (2003):** Forest Cover Change in the Western Carpathians in the Past 180 Years. *Mountain Research and Development*, 23(4): s. 369–375.
- KOZAK, J., ESTREGUIL, Ch., TROLL, M. (2007):** Forest cover changes in the northern Carpathians in the 20th century. *Journal of Land Use Science*, 2(2): s. 127–146.
- KÖRNER, Ch. (1998):** A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115: s. 445–459.
- KÖRNER, Ch., PAULSEN, J. (2004):** A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31: s. 713–732.
- KÖRNER, Ch. (2007a):** Climatic treelines: conventions, global patterns, causes. *Erdkunde*, 61: s. 316–324.
- KÖRNER, Ch. (2007b):** The use of altitude in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution*, 22: s. 569–574.
- KÖRNER, Ch. (2012):** *Alpine treelines: Functional ecology of the global high elevation tree limits*. Springer, Basel.
- KRÁL, V. (1999):** *Fyzická geografie Evropy*. Academia, Praha.
- KULAKOWSKI, D., BARBEITO, I., CASTELLER, A., KACZKA, R. J., BEBI, P. (2016):** *Geographia Polonica*, 89(1): s. 7–15.
- KULLMAN, L., ÖBERG, L. (2009):** Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective. *Journal of Ecology*, 97: s. 415–429.
- KVĚTOŇ, V. (2001):** Normály teploty vzduchu na území České republiky v období 1961–1990 a vybrané teplotní charakteristiky období 1961–1990. Český hydrometeorologický ústav, Praha.



- LLOYD, A. H. (2005):** Ecological histories from Alaskan tree lines provide insight into future change. *Ecology*, 86(7): s. 1687–1695.
- MAMET, S. D., KERSHAW, G. P. (2013):** Age-dependency, climate, and environmental controls of recent tree growth trend at subarctic and alpine treelines. *Dendrochronologia*, 31: s. 75–87.
- MARTAZINOVA, V., IVANOVA, O., SHANDRA, O. (2011):** Climate and treeline dynamics in the Ukrainian Carpathians Mts. *Folia Oecologica*, 38(1): s. 65–71.
- MICU, D. M., DUMITRESCU, A., CHEVAL, S., BIRSAN, M.-V. (2015):** Climate of the Romanian Carpathians: Variability and Trends. Springer, Basel.
- MIGAŁA, K. (2005):** Piętra klimatyczne v górach Europy a problem zmian globalnych. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- MIHAI, B., SAVULESCU, I., SANDRIC, I. (2007):** Change Detection Analysis (1986–2002) of Vegetation Cover in Romania. *Mountain Research and Development*, 27(3): s. 250–258.
- MIKOLÁŠKOVÁ, K. (2009):** A regression evaluation of thermal continentality. *Geografie*, 114: s. 350–362.
- MORALES, M. S., VILLALBA, R., RICARDO GRAU, H., PAOLINI, L. (2004):** Rainfall-controlled tree growth in high-elevation subtropical treelines. *Ecology*, 85(11): s. 3080–3089.
- MOTTA, R., MORALES, M., NOLA, P. (2006):** Human land-use, forest dynamics and tree growth at the treeline in the Western Italian Alps. *Annals of Forest Science*, 63: s. 739–747.
- MUNTEANU, C., KUEMMERLE, T., BOLTŽIAR, M., BUTSIC, V., GIMMI, U., HALADA, Ľ., KAIM, D., KIRÁLY, G., KONKOLY-GYURÓ, É., KOZAK, J., LIESKOVSKÝ, J., MOJSES, M., MÜLLER, D., OSTAFIN, K., OSTAPOWICZ, K., SHANDRA, O., ŠTYCH, P., WALKER, S., RADELOFF, V. C. (2014):** Forest and agricultural land change in the Carpathian region – A meta-analysis of long-term patterns and drivers of change. *Land Use Policy*, 38: s. 685–697.
- NETOPIL, R., BIČÍK, I., BRINKE, J. (1989):** Geografie Evropy. Státní pedagogické nakladatelství, Praha.
- OSTROŽLÍK, M. (2010):** Variability of the air temperature and atmospheric precipitation in the high-mountain positions of the Low and High Tatras in winter. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 40(1): s. 87–101.
- PAULSEN, J., KÖRNER, Ch. (2014):** A climate-based model to predict potential treeline position around the globe. *Alp Botany*, 124(1): s. 1–12.
- PIERMATTERI, A., LINGUNAM E., URBINATI, C., GARBARIANO, M. (2016):** *Pinus nigra* anthropogenic treelines in the central Apennines show common pattern of tree recruitment. *European Journal of Forest Research*, 135: s. 1119–1130.

- PITICAR, A, RISTOIU, D. (2012):** Analysis of air temperature evolution in Northeastern Romania and evidence of warming trend. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 7(4): s. 97–109.
- PLESNÍK, P. (1971):** Horná hranica lesa vo Vysokých a Belanských Tatrách. Slovenská akadémia vied, Bratislava.
- PLESNÍK, P. (1978):** Man's influence on the timberline in the West Carpathian Mountains, Czechoslovakia. *Arctic and Alpine Research*, 10(2): s. 491–504.
- SCHICKHOFF, U. (2005):** The upper timberline in the Himalayas, Hindu Kush and Karakorum: a review of geographical and ecological aspects. In: Broll, G.: *Mountain ecosystems: studies in treeline ecology*. Springer, Berlin.
- SENN, J. (1999):** Tree mortality caused by *Gremmeniella abietina* in subalpine afforestation in the central Alps and its relationship with duration of snow cover. *European Journal of Forest Pathology*, 29: s. 65–74.
- SHANDRA, O., WEISBERG, P., MARTAZINOVA, V. (2013):** Influences of Climate and Land Use History on Forest and Timberline Dynamics in the Carpathian Mountains During the Twentieth Century. In: Kozak, J. a kol.: *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*. Springer, Berlin.
- SITKO, I., TROLL, M. (2008):** Timberline changes in relation to summer farming in the Western Chornohora (Ukrainian Carpathians). *Mountain Research and Development*, 28(3/4): s. 263–271.
- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., MARQUIS, M., AVERYT, K., TIGNOR, M. M. B., MILLER LEROY, H., CHEN, Z. (2007):** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- SULLIVAN, P. F., ELLISON, S. B., MCNOWN, R. W., BROWNLEE, A. H., SVEINBJÖRNSSON, B. (2015):** Evidence of soil nutrient availability as the proximate constraint on growth of treeline trees in northwest Alaska. *Ecology*, 96(3): s. 716–727.
- ŠLÉGL, J. (2005):** Světová pohoří: přehledové i podrobné mapy. Euromedia Group, Praha.
- TAKAHASHI, K. (2014):** Effect of wind and thermal conditions on timberline formation in central Japan: a lattice model. *Ecological Research*, 29: s. 121–131.
- TASSER, E., LEITINGER, G., TAPPEINER, U. (2016):** Climate change versus land-use change – What affects the mountain landscapes more? *Land Use Policy*, 60: s. 60–72.
- THEURILLAT, J.-P., GUISAN, A. (2001):** Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. *Climatic Change*, 50: s. 77–109.
- TOMÁŠEK, M. (2014):** *Půdy České republiky*. Česká geologická služba, Praha.

- TRANQUILLINI, W. (1979):** Physiological ecology of the Alpine Timberline. Springer, Berlin.
- TREML, V., BANAŠ, M. (2008):** The effect of exposure on alpine treeline position: a case study from the High Sudetes, Czech Republic. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40(4): s. 751–760.
- TREML, V., ŠENFELDR, M., CHUMAN, T., PONOCNÁ, T., DEMKOVÁ, K. (2016):** Twentieth century treeline ecotone advance in the Sudetes Mountains (Central Europe) was induced by agricultural land abandonment rather than climate change. *Journal of Vegetation Science*, 27: s. 1209–1221.
- TREML, V., VEBLEN, T. T. (2017):** Does tree growth sensitivity to warming trends vary according to treeline form? *Journal of Biogeography*, 44: s. 1469–1480.
- VAGANOV, E. A., HUGHES, M. K., KIRDYANOV, A. V., SCHWEINGRUBER, F. H., SILKIN, P. P. (1999):** Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, 400(8): s. 149–151.
- VOTÝPKA, J. (1994):** Fyzická geografie Evropy. Karolinum, Praha.
- WALLENTIN, G., TAPPEINER, U., STROBL, J., TASSER, E. (2008):** Understanding alpine treeline dynamics: An individual-based model. *Ecological Modelling*, 218: s. 235–246.
- WEISBERG, P. J., SHANDRA, O., BECKER, M. E. (2013):** Landscapes Influences on Recent Timberline Shifts in the Carpathian Mountains: Abiotic Influences Modulate Effects of Land-Use Change. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 45(3): s. 404–414.
- ZHAO, F., ZHANG, B., PANG, Y., YAO, Y. (2014):** A study of the contribution of mass elevation effect to the altitudinal distribution of timberline in the Northern Hemisphere. *Journal of Geographical Sciences*, 24: s. 226–236.

**CRU TS 4.00:** Gridová teplotní databáze. [online]. [cit. 05.07.2017]. Dostupné z: <http://www.cru.uea.ac.uk/>

**KNMI CLIMATE EXPLORER:** The Global Historical Climatology Network-Monthly (GHCN-M) temperature dataset. [online]. [cit. 29.06.2017]. Dostupné z: <https://climexp.knmi.nl/getstations.cgi>

**KNMI CLIMATE EXPLORER:** The Global Historical Climatology Network-Daily (GHCN-D) ver. 2 temperature dataset. [online]. [cit. 14.05.2017]. Dostupné z: <https://climexp.knmi.nl/selectdailyseries.cgi?id=someone@somewhere>

**WORLDCLIM - GLOBAL CLIMATE DATA:** Gridová databáze teplotních měsíčních průměrů za období 1961–1990. [online]. [cit. 20.05.2017]. Dostupné z: <http://www.worldclim.org/current>